



# Analyse du couplage personne-système haptique

Diana Herrera Gamba Herrera Gamba

## ► To cite this version:

Diana Herrera Gamba Herrera Gamba. Analyse du couplage personne-système haptique. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT: 2012GRENS021 . tel-01018774

**HAL Id: tel-01018774**

**<https://theses.hal.science/tel-01018774>**

Submitted on 5 Jul 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Ingénierie de la Cognition, de l'Interaction, de l'Apprentissage et de la Création**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Diana Herrera**

Thèse dirigée par **Jean-Loup Florens**

et codirigée par **Alina Voda**

préparée au sein du **Laboratoire ICA (Informatique et Création Artistique)** et du **laboratoire GIPSA-Lab (Grenoble Images Parole Signal Automatique)**

et de l'**Ecole Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement**

## Analyse du couplage personne-système haptique

Thèse soutenue publiquement le **4 juillet 2012**,

devant le jury composé de :

**M. Moustapha Hafez**

Directeur de recherche, CEA-LIST, Rapporteur

**M. Stéphane Régnier**

Professeur, ISIR-UPMC, Rapporteur

**Mr, Pierre-Yves Coulon**

Professeur, Grenoble INP, Examineur

**M. Jean-Loup Florens**

Ingénieur de recherche, ACROE - Laboratoire ICA, Directeur de thèse

**Mme. Alina Voda**

Maitre de conférences, Université Joseph Fourier, Invitée





# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>vi</b>
<b>Table des figures</b>	<b>x</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>xiii</b>
<b>Résumé</b>	<b>xv</b>
<b>Abstract</b>	<b>xvii</b>
<b>Abréviations</b>	<b>xix</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1 Contexte . . . . .	1
2 Problématique . . . . .	2
3 Organisation du document . . . . .	3
<b>1 Analyse du couplage homme-objet : État de l’art</b>	<b>5</b>
1 Introduction . . . . .	5
2 Couplage homme-objet en perception et cognition . . . . .	6
2.1 La main comme organe de perception et d’exploration . . . . .	7
2.2 Le couplage humain-environnement . . . . .	7
2.3 L’enaction . . . . .	8
2.4 L’incorporation . . . . .	9
2.5 Le concept de « Présence » . . . . .	10
3 Couplage homme - objet en automatique et robotique . . . . .	10
3.1 De la main humaine à la main robotique . . . . .	11
3.2 Contrôle du mouvement . . . . .	12
4 Couplage homme-objet en systèmes haptiques et interaction personne - système . . . . .	13
4.1 Interaction homme-objet dans l’haptique . . . . .	13



4.2	Contrôle de la force de préhension . . . . .	14
4.3	Mouvements de la main pour atteindre une cible . . . . .	15
4.4	L'utilisation des outils . . . . .	16
4.5	Le rôle des sens haptique et visuel dans l'exploration de l'environnement . . . . .	17
4.6	L'approche d'un système hybride temporaire . . . . .	17
4.7	Approches fonctionnelles dans la recherche en haptique . . . . .	18
4.8	Interaction avec les dispositifs technologiques . . . . .	19
5	Synthèse de la problématique du couplage homme-objet . . . . .	21
6	Conclusion . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Couplage homme-environnement virtuel</b>	<b>25</b>
1	Introduction . . . . .	25
2	Catégories de couplage . . . . .	26
2.1	Couplage homme-objet en situation naturelle . . . . .	28
2.2	Situation médiatisée : Couplage entre l'homme et l'environnement virtuel . . . . .	28
3	Modélisation du couplage . . . . .	30
3.1	Notion de force . . . . .	30
3.2	Notion électrique . . . . .	31
4	Problématique du couplage dans le contexte de la simulation haptique . . . . .	31
5	Analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique . . . . .	33
5.1	L'interface haptique comme support du couplage homme-environnement virtuel . . . . .	34
5.1.1	La Téléopération . . . . .	34
5.1.2	De la téléopération à l'haptique . . . . .	35
5.1.3	Performances des dispositifs haptiques . . . . .	36
5.2	Approches pour l'analyse du couplage homme-environnement virtuel . . . . .	36
5.2.1	Le rôle de l'enaction et de l'incorporation dans l'analyse du système couplé homme-objet . . . . .	36
5.2.2	Le système homme-système haptique vu comme un système hybride temporaire . . . . .	37
5.3	Méthode pour l'analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique . . . . .	38
6	Conclusion . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Typologie du geste pour l'analyse du couplage</b>	<b>39</b>
1	Introduction . . . . .	39
2	Le geste . . . . .	40
3	La préhension dans la main humaine . . . . .	41
3.1	Classification des modes de préhension selon la forme de l'objet . . . . .	42
3.2	Classification selon la forme de la main lors de la saisie . . . . .	43

3.3	Classification des modes de préhension selon la surface de la main en contact avec l'objet . . . . .	44
3.4	Classification selon la fonction de la main . . . . .	44
3.5	Classification selon la force et la précision requises pour la saisie . . . . .	45
3.6	Autres classifications générales des modes de préhension . . . . .	47
4	Le geste instrumental . . . . .	47
4.1	Classification des gestes selon leur nature intrinsèque . . . . .	48
4.2	Classification des gestes selon leur fonction vis à vis de l'instrument . . . . .	48
4.3	Classification des gestes selon des critères d'analyse . . . . .	48
4.4	Classification des gestes selon sa finalité . . . . .	49
5	Typologie du geste dans le cadre du couplage homme-système haptique . . . . .	49
5.1	Classification des gestes selon le contact avec l'environnement . . . . .	50
5.1.1	Classification des gestes selon l'existence ou non du contact . . . . .	50
5.1.2	Classification des gestes selon la durée du contact . . . . .	50
5.2	Classification des gestes selon la préhension . . . . .	50
5.2.1	Classification des gestes selon la réalisation d'un geste de préhension . . . . .	50
5.2.2	Classification des gestes selon le mode de préhension . . . . .	50
5.3	Classification des gestes selon l'énergie . . . . .	51
5.4	Classification des gestes selon la fréquence d'exécution . . . . .	51
6	Conclusion . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Modèles de couplage et méthodes pour l'identification de leurs paramètres</b>	<b>53</b>
1	Introduction . . . . .	53
2	Modélisation de l'interaction dans le cas de mouvements périodiques . . . . .	54
2.1	Modèle basé sur l'équation de Van der Pol . . . . .	55
2.2	Modèle d'un objet virtuel actif . . . . .	56
2.3	Définition des paramètres du dispositif haptique . . . . .	58
2.4	Définition des paramètres de l'homme . . . . .	59
3	Description et validation des méthodes d'identification des paramètres du modèle basé sur l'équation de Van der Pol . . . . .	61
3.1	Méthode des Moindres Carrés (LSM) . . . . .	61
3.1.1	Simulations et résultats pour le modèle de Van der Pol classique en utilisant la méthode des moindres carrés : Cas sans bruit . . . . .	63
3.1.2	Simulations et résultats pour le modèle de Van der Pol classique en utilisant la méthode des moindres carrés : Ajout du bruit au modèle . . . . .	64
3.2	Identification du modèle de Van der Pol par un filtre de Kalman-Bucy étendu (EKBF) . . . . .	71
3.2.1	Filtre de Kalman-Bucy étendu classique . . . . .	71
3.2.2	Approche par changement de variable . . . . .	73

3.2.3	Simulations et résultats	74
4	Description et validation des méthodes pour l'identification des paramètres du modèle des oscillations auto-entretenues	82
4.1	Estimation des paramètres du modèle virtuel	84
4.1.1	Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas sans bruit	84
4.1.2	Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas bruité	87
4.2	Estimation des paramètres de l'homme	88
4.2.1	Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas sans bruit	88
4.2.2	Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas bruité	89
5	Conclusion	90
<b>5</b>	<b>Mise en œuvre d'un dispositif pour l'analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique</b>	<b>93</b>
1	Introduction	93
2	Plateforme temps réel ERGON_X	94
2.1	Description du simulateur haptique	94
2.1.1	Les premières plateformes multisensorielles ICA/ACROE	94
2.1.2	Les dispositifs haptiques ERGOS	96
2.1.3	Le conditionneur électronique	98
2.1.4	L'architecture de la plateforme temps-réel ERGON_X	99
2.1.5	La console Gamma	102
2.2	Échange de données entre le DSP et l'ordinateur hôte	103
3	Mise en œuvre d'un protocole d'acquisition de données	106
3.1	L'acquisition par DMA	107
3.2	L'acquisition par Buffer Circulaire	108
4	Equivalence entre les paramètres du simulateur et les paramètres réels	111
4.1	Relations entre l'environnement réel et l'environnement virtuel	111
4.1.1	Cas d'un échantillonneur idéal	113
4.1.2	Cas d'un reconstituteur impulsionnel	114
4.1.3	Cas d'un bloqueur d'ordre zéro	114
4.1.4	Définition des gains statiques de position et de force dans le cas d'un simulateur ERGON_X	115
4.2	Equivalence entre les paramètres réels et virtuels	116
4.2.1	Définition des paramètres de base	116
4.2.2	Définition de la position, de la vitesse et de l'accélération selon Cordis Anima	118

4.2.3	Equivalence entre la raideur virtuelle et la raideur réelle . . . . .	120
4.2.4	Equivalence entre la viscosité virtuelle et la viscosité réelle . . . . .	120
4.2.5	Equivalence entre la masse virtuelle et la masse réelle . . . . .	121
4.2.6	Récapitulatif des équivalences . . . . .	122
4.3	Étalonnage Statique . . . . .	122
4.3.1	Le modèle Test_à_8 et le réglage des positions . . . . .	122
4.3.2	Réglage des forces . . . . .	124
4.4	Mesure du poids du complexe touche-tranche . . . . .	126
4.5	Test de mesure de la raideur réelle . . . . .	126
4.6	Test de fréquence . . . . .	127
5	Analyse du frottement sec . . . . .	128
6	Définition d'un filtre dans le DSP . . . . .	130
7	Conclusion . . . . .	131
<b>6</b>	<b>Analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique</b>	<b>133</b>
1	Introduction . . . . .	134
2	Analyse du modèle auto-entretenu . . . . .	134
2.1	Simulation Matlab du modèle auto-entretenu . . . . .	135
2.2	Simulation sur la plateforme temps réel du modèle auto-entrenu . . . . .	136
2.3	Résultats . . . . .	136
3	Validation de la méthode d'identification des paramètres à partir de données réelles et caractérisation du TGR . . . . .	137
3.1	Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 1 . . . . .	140
3.2	Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 2 . . . . .	142
3.3	Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 3 . . . . .	142
4	Analyse expérimentale du couplage homme-système haptique pour des gestes périodiques	143
4.1	Le modèle de Van der Pol comme un générateur de gestes périodiques . . . . .	143
4.2	Protocole expérimental . . . . .	144
4.3	Résultats . . . . .	145
4.4	Analyse du geste passif en utilisant un objet virtuel actif . . . . .	147
4.5	Protocole Expérimental . . . . .	147
4.5.1	Cas d'expérimentation . . . . .	148
4.5.2	Compensation de la force exercée par la main . . . . .	148
4.6	Mesures préliminaires du geste passif . . . . .	149
4.7	Identification des composantes passives du geste . . . . .	150
4.7.1	Analyse des résultats pour le Sujet 1 . . . . .	151

4.7.2	Analyse des résultats pour le Sujet 2 . . . . .	152
4.7.3	Analyse des résultats pour le Sujet 3 . . . . .	153
4.7.4	Analyse des résultats pour le Sujet 4 . . . . .	153
4.8	Analyse générale . . . . .	154
5	Proposition d'un nouveau protocole expérimental . . . . .	155
6	Conclusion . . . . .	156
<b>Conclusion</b>		<b>159</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>163</b>
<b>Annexes</b>		<b>171</b>
<b>A Le Formalisme Cordis Anima</b>		<b>171</b>
A.1	Les points de communication . . . . .	171
A.2	Les modules Cordis Anima . . . . .	172
A.3	Les algorithmes Cordis Anima . . . . .	174
A.4	Equivalence entre les paramètres Cordis Anima et les paramètres physiques . . . . .	175
A.5	Interaction entre le TGR et les modèles CORDIS . . . . .	175
A.6	Applications du formalisme Cordis Anima . . . . .	176
<b>B La technologie ERGOS</b>		<b>177</b>
B.1	Caractéristiques Générales . . . . .	177
B.2	Caractéristiques Mécaniques . . . . .	177
B.3	Caractéristiques des actionneurs de la technologie ERGOS . . . . .	178
B.4	Caractéristiques des capteurs de la technologie ERGOS . . . . .	178
B.5	Habillages mécaniques disponibles dans la technologie ERGOS . . . . .	178

# Table des figures

1.1	Couplage force - position lors de l'interaction mécanique homme - environnement . . . . .	8
1.2	Vue philosophique de l'action et de la perception humaine selon Heidegger-Gibson . . . . .	8
1.3	Le cône de l'expérience . . . . .	9
1.4	Modèle de contrôle en impédance du bras . . . . .	13
1.5	Le dispositif haptique crée une boucle fermée entre l'opérateur humain et le rendu haptique	14
1.6	Zone de contact entre le doigt et l'objet saisi. Distribution collage/glissement . . . . .	15
1.7	Analyse des trajectoires lors de la manipulation d'objets flexibles . . . . .	16
1.8	Système hybride temporaire (THS) en situation naturelle . . . . .	18
1.9	Système hybride temporaire (THS) en situation artificielle . . . . .	18
1.10	Représentation des différentes approches fonctionnelles . . . . .	19
1.11	Interaction de l'opérateur humain dans une boucle de contrôle simple . . . . .	20
1.12	Interaction humaine avec un système d'aide à la décision sur ordinateur . . . . .	20
1.13	Interaction haptique dans le contrôle d'un procédé dynamique . . . . .	20
2.1	Couplage en situation artificielle . . . . .	29
2.2	La boucle « perception, cognition, action » en situation médiatisée . . . . .	29
2.3	Définition du couplage du point de vue des forces. . . . .	30
2.4	Un système composé d'une masse réelle et d'un ressort réel et son équivalent avec un ressort virtuel. . . . .	32
2.5	Des systèmes composés d'une masse réelle et soit de deux ressorts réels, de deux ressorts virtuels ou d'un assemblage hybride d'un ressort réel et d'un ressort virtuel. . . . .	33
2.6	Modèle général à deux ports d'un système bilatéral de téléopération . . . . .	34
3.1	Modèles de préhension proposés par Schlesinger en 1919 . . . . .	42
3.2	Modes de saisie proposés par Napier. . . . .	45
3.3	Modes de saisie proposés par Lyons. . . . .	46
4.1	Fonction non linéaire pour les paramètres $F_0 = -2.16N$ et $v_0 = 0.008 \frac{m}{s^2}$ . . . . .	58
4.2	Modèle TGR-objet virtuel . . . . .	59
4.3	Modèle main-bras à 2 degrés de liberté . . . . .	60

4.4	Modèle main-bras à 3 degrés de liberté . . . . .	60
4.5	Modèle de l'homme pour l'analyse du geste passif . . . . .	61
4.6	Modèle général pour l'analyse du geste passif . . . . .	61
4.7	Résultats de simulation du modèle de Van der Pol sans bruit . . . . .	63
4.8	Modèle du système avec ajout de bruit en sortie . . . . .	64
4.9	Modèle du système avec ajout de bruit dans la boucle de simulation . . . . .	65
4.10	Comparaison entre les variables $x$ , $\dot{x}$ et $\ddot{x}$ issues de la simulation sans bruit et les variables bruitées $x_b$ , ainsi que $\dot{x}_b$ et $\ddot{x}_b$ obtenues par dérivation de $x_b$ , pour les paramètres du groupe 3 : $\gamma = 0.5$ , $\omega = 3$ , $x_0 = 4.5$ . . . . .	67
4.11	Comparaison entre les signaux filtrés $x_{bf}$ , $\dot{x}_{bf}$ et $\ddot{x}_{bf}$ et les signaux obtenus lors de la simulation sans bruit $x$ , $\dot{x}$ et $\ddot{x}$ pour les paramètres du groupe 3 : $\gamma = 0.5$ , $\omega = 3$ , $x_0 = 4.5$ . . . . .	68
4.12	Estimation de $\gamma_0$ pour des valeurs de $\alpha = 0$ et $\alpha = 0.1$ dans l'équation modifiée de Riccati (4.42) . . . . .	75
4.13	Estimation de $\omega$ pour des valeurs de $\alpha = 0$ et $\alpha = 0.1$ dans l'équation modifiée de Riccati (4.42) . . . . .	75
4.14	Estimation de $x_0$ pour des valeurs de $\alpha = 0$ et $\alpha = 0.1$ dans l'équation modifiée de Riccati (4.42) . . . . .	76
4.15	Exemple de divergence de l'estimation de $\gamma_0$ lorsque nous modifions les conditions initiales . . . . .	76
4.16	Exemple de divergence de l'estimation de $\omega$ lorsque nous modifions les conditions initiales . . . . .	77
4.17	Exemple de divergence de l'estimation de $x_0$ lorsque nous modifions les conditions initiales . . . . .	77
4.18	Estimation de $\gamma_0$ avec un filtre EKBF pour un cas bruité . . . . .	78
4.19	Estimation de $x_0$ avec un filtre EKBF pour un cas bruité . . . . .	79
4.20	Estimation de $\omega$ avec un filtre EKBF pour un cas bruité . . . . .	79
4.21	Estimation de $\gamma_0$ avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas sans bruit . . . . .	80
4.22	Estimation de $\omega$ avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas sans bruit . . . . .	80
4.23	Estimation de $x_0$ avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas sans bruit . . . . .	81
4.24	Estimation de $\gamma_0$ avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas bruité . . . . .	81
4.25	Estimation de $\omega$ avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas bruité . . . . .	82
4.26	Signal de position obtenu lors de la simulation MATLAB/Simulink pour les paramètres définis dans le Tableau 4.6 . . . . .	85
4.27	Signal de vitesse obtenu lors de la simulation MATLAB/Simulink pour les paramètres définis dans le Tableau 4.6 . . . . .	85
4.28	Signal d'accélération obtenu lors de la simulation MATLAB/Simulink pour les paramètres définis dans le Tableau 4.6 . . . . .	85
4.29	Signal de vitesse $\dot{x}_d$ calculé par dérivation à partir de la position $x_s$ , comparé avec le signal de vitesse $\dot{x}_s$ issu de la simulation. . . . .	86
4.30	Signal d'accélération $\ddot{x}_d$ calculé par dérivation à partir de la position $x_s$ , comparé avec le signal d'accélération $\ddot{x}_s$ issu de la simulation. . . . .	86
4.31	Modèle du système avec les paramètres généraux et ajout de bruit en sortie . . . . .	87

4.32 Signal de position bruité $x_b$ et son signal filtré $x_f$ . . . . .	87
4.33 Vitesse $\dot{x}_d$ calculée par dérivation à partir du signal de position filtré $x_f$ . . . . .	88
4.34 Accélération $\ddot{x}_d$ calculée par dérivation à partir du signal de position filtré $x_f$ . . . . .	88
5.1 Première interface gestuelle conçue pour la simulation d'objets virtuels . . . . .	94
5.2 <i>La Touche</i> , interface gestuelle inspirée d'une touche de piano . . . . .	95
5.3 Clavier Rétroactif Modulaire inspiré d'un clavier de piano . . . . .	95
5.4 Clavier Rétroactif Modulaire avec différents manipulateurs . . . . .	96
5.5 Configuration à flux magnétique partagé . . . . .	97
5.6 La console <i>Gamma</i> à 12 degrés de liberté . . . . .	97
5.7 Transducteur gestuel rétroactif à 6 tranches dans la configuration classique de clavier . . . . .	98
5.8 Différentes configurations de manipulateurs sur le dispositif ERGOS . . . . .	98
5.9 Face avant du conditionneur électronique . . . . .	99
5.10 Configuration générale d'un simulateur multisensoriel . . . . .	99
5.11 Carte <i>TORO</i> manufacturée par <i>Innovative Integration</i> . . . . .	100
5.12 Diagramme de la carte <i>TORO</i> . . . . .	101
5.13 Architecture de la plateforme de simulation ERGON_X . . . . .	102
5.14 Dispositif haptique à 12 degrés de liberté pour la console <i>Gamma</i> . . . . .	103
5.15 Automate d'états du programme principal exécuté sur le DSP . . . . .	105
5.16 Organisation des zones mémoire de la SRAM . . . . .	106
5.17 Zone mémoire de communication entre le PC hôte et le DSP dans la mémoire SRAM . . . . .	107
5.18 Changements logiciels implémentés sur l'ordinateur hôte . . . . .	108
5.19 Changements logiciels implémentés sur le DSP . . . . .	108
5.20 Nouvelle organisation des zones mémoire de la SRAM . . . . .	109
5.21 Buffer circulaire . . . . .	110
5.22 Structure à trois colonnes du fichier de données acquises lors de la simulation . . . . .	110
5.23 Configuration temps réel interfacée avec le protocole de récupération de données . . . . .	111
5.24 Équivalence entre l'environnement réel et l'environnement virtuel . . . . .	116
5.25 Module « CEL » du formalisme Cordis Anima . . . . .	117
5.26 Algorithme de la raideur suivant la normalisation par correspondance de la raideur . . . . .	118
5.27 Algorithme de la viscosité suivant la normalisation par correspondance de la raideur . . . . .	118
5.28 Algorithme de la masse suivant la normalisation par correspondance de la raideur . . . . .	119
5.29 Interface visuelle du modèle Test_à_8, montrant la position de 8 tranches du TGR . . . . .	123
5.30 Déplacement des tranches du TGR de $\pm 10mm$ à partir de la position zéro . . . . .	123
5.31 Touche du TGR avec un poids ajouté . . . . .	125
5.32 Oscillation de la touche du TGR lors de la simulation d'un ressort de raideur $K$ . . . . .	128
5.33 Commande en position pour le test du frottement sec . . . . .	128



5.34 Définition de la consigne de position . . . . .	129
5.35 Position du TGR, $x_{TGR}$ . . . . .	129
5.36 Force du TGR, $f_{TGR}$ . . . . .	129
5.37 Force du TGR, $f_{TGR}$ vs. Position du TGR, $x_{TGR}$ . . . . .	130
6.1 Signal de position $x_s$ obtenu lors de la simulation Matlab/Simulink avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1 . . . . .	135
6.2 Signal de force $f_s$ obtenu lors de la simulation Matlab/Simulink avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1 . . . . .	135
6.3 Signal de position $x_r$ obtenu lors de la simulation temps réel avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1 . . . . .	136
6.4 Signal de force $f_r$ obtenu lors de la simulation temps réel avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1 . . . . .	137
6.5 Signal de position acquis et son signal filtré pour la Mesure 2 et pour le Groupe 1 de paramètres . . . . .	140
6.6 Signal de vitesse obtenu par une simple dérivation du signal de position filtré pour la Mesure 2 et pour le Groupe 1 de paramètres . . . . .	140
6.7 Signal d'accélération obtenu par une double dérivation du signal de position filtré pour la Mesure 2 et pour le Groupe 1 de paramètres . . . . .	141
6.8 Dispositif haptique utilisé pour l'expérience . . . . .	144
6.9 Représentation visuelle de la position de l'objet virtuel . . . . .	144
6.10 Données de position obtenues : expérience (1b) avec $K = 0.1$ et $B = 50$ . . . . .	145
6.11 Données de position filtrées obtenues : expérience (1b) avec $K = 0.1$ et $B = 50$ . . . . .	146
6.12 Données de position obtenues en simulant le modèle sur Matlab et en utilisant les paramètres estimés lors de l'expérience (1b) avec $K = 0.1$ et $B = 50$ . . . . .	147
6.13 Configuration expérimentale pour les Cas 1 et 2 . . . . .	148
6.14 Position mesurée lors de l'expérience pour les 4 cas proposés . . . . .	149
6.15 Configuration expérimentale pour les Cas 1 et 2 . . . . .	151
6.16 Capteur de force sur la touche du TGR . . . . .	155
6.17 Connexion du capteur de force au système et à la carte TORO pour l'acquisition des données	156
A.1 Représentation des points de communication Cordis Anima . . . . .	171
A.2 Connexion entre un point de communication « M » et un point de communication « L » . . . . .	172
A.3 Modules élémentaires <MAT> et <LIA> . . . . .	173
A.4 Exemple de réseau Cordis Anima . . . . .	173
A.5 Un TGR en mode impédance vu comme un module de type <MAT> . . . . .	176
A.6 Un TGR en mode admittance vu comme un module de type <LIA> . . . . .	176
B.1 Gamme des dispositifs ERGOS avec différentes morphologies de manipulateur . . . . .	179

# Liste des tableaux

2.1	Possibilités de couplages entre deux interacteurs (homme et/ou objet) . . . . .	27
2.2	Possibilités de couplages entre deux interacteurs (Homme et/ou Objet) selon leur environnement réel ou virtuel . . . . .	27
3.1	Fréquences des modes de préhension . . . . .	44
4.1	SNR des trois groupes de paramètres selon la puissance du bruit choisie . . . . .	66
4.2	Identification des paramètres du modèle de Van der Pol : Cas 1 sans filtrage . . . . .	69
4.3	Identification des paramètres du modèle de Van der Pol : Cas 1 avec filtrage . . . . .	70
4.4	Identification des paramètres du modèle de Van der Pol : Cas 3 . . . . .	70
4.5	Paramètres estimés pour l'EKBF et la méthode de changement de variable pour un cas bruité . . . . .	82
4.6	Paramètres du modèle utilisé pour la simulation Matlab . . . . .	84
4.7	Paramètres simulés et paramètres identifiés dans le cas où la position est obtenue par simulation et la vitesse et l'accélération par dérivation . . . . .	86
4.8	Paramètres simulés et paramètres identifiés du modèle virtuel pour le cas bruité . . . . .	88
4.9	Paramètres de l'homme utilisés pour la simulation Matlab . . . . .	89
4.10	Paramètres généraux utilisés pour la simulation Matlab . . . . .	89
4.11	Paramètres généraux simulés et estimés pour le cas bruité . . . . .	89
5.1	Variables de position et de force dans les mondes réel et virtuel . . . . .	112
5.2	Equivalences entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs virtuelles selon la normalisation par correspondance de la raideur. . . . .	122
5.3	Déplacement virtuel $X$ des touches 0 à 3 selon le déplacement réel $x$ . . . . .	123
5.4	Calcul de l'effet du bras du levier selon le poids ajouté . . . . .	125
5.5	Masses et forces équivalentes aux points A et B selon le poids ajouté . . . . .	125
5.6	Variation du déplacement virtuel et de la force selon le poids ajouté . . . . .	125
5.7	Masses et forces équivalentes selon le poids . . . . .	127
6.1	Valeurs virtuelles et leurs équivalences réelles des paramètres pour la simulation du modèle auto-entretenu avec $\alpha = 8.775$ et $\beta = 105.08$ . . . . .	135

6.2	Description des mesures effectuées pour la caractérisation du TGR . . . . .	139
6.3	Valeurs virtuelles et leurs équivalences réelles des paramètres pour la simulation du modèle auto-entretenu avec $\alpha = 10$ et $\beta = 113.5$ . . . . .	139
6.4	Valeurs des paramètres de la partie active de l'objet virtuel et leurs équivalences réelles pour la simulation du modèle auto-entretenu avec $\alpha = 10$ et $\beta = 113.5$ . . . . .	139
6.5	Résultats de l'identification de la masse totale $\hat{m}_T$ avec le Groupe 1 de paramètres ( $k = 1135$ et $b = 11.35$ ) . . . . .	141
6.6	Résultats de l'identification de la viscosité totale $\hat{b}_T$ avec le Groupe 1 de paramètres ( $k = 1135$ et $b = 11.35$ ) . . . . .	141
6.7	Résultats de l'identification de la masse totale $\hat{m}_T$ avec le Groupe 2 de paramètres ( $k = 1135$ et $b = 5.675$ ) . . . . .	142
6.8	Résultats de l'identification de la viscosité totale $\hat{b}_T$ avec le Groupe 2 de paramètres ( $k = 1135$ et $b = 5.675$ ) . . . . .	142
6.9	Résultats de l'identification de la masse totale $\hat{m}_T$ avec le Groupe 3 de paramètres ( $k = 2270$ et $b = 11.35$ ) . . . . .	142
6.10	Résultats de l'identification de la viscosité totale $\hat{b}_T$ avec le Groupe 3 de paramètres ( $k = 2270$ et $b = 11.35$ ) . . . . .	143
6.11	Groupes de paramètres définis pour l'expérience . . . . .	145
6.12	Résultats de l'identification des paramètres $\gamma_0$ , $\omega$ et $x_0$ pour un sujet selon les groupes de paramètres ( $K$ et $B$ ) définis pour les expériences . . . . .	146
6.13	Analyse des mesures préliminaires . . . . .	149
6.14	Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 1 . . . . .	152
6.15	Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 2 . . . . .	152
6.16	Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 3 . . . . .	153
6.17	Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 4 . . . . .	154
6.18	Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 5 . . . . .	154
A.1	Equivalences entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs virtuelles selon la normalisation par correspondance de la raideur. . . . .	175
B.1	Caractéristiques générales de la technologie ERGOS . . . . .	177
B.2	Caractéristiques mécaniques de la technologie ERGOS . . . . .	177
B.3	Caractéristiques des actionneurs de la technologie ERGOS . . . . .	178
B.4	Caractéristiques des capteurs de la technologie ERGOS . . . . .	178
B.5	Habillages mécaniques disponibles dans la technologie ERGOS . . . . .	178

# Remerciements

Je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur soutien et qui d'une façon ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Jean-Loup Florens, mon directeur de thèse, qui s'est toujours montré à l'écoute et disponible tout au long de cette thèse, pour les discussions scientifiques et non scientifiques, pour ses conseils, son soutien et ses encouragements. Mes remerciements s'adressent également à ma codirectrice de thèse Mme. Alina Voda pour ses conseils, ses remarques et ses contributions à cette thèse. Je vous suis très reconnaissante pour votre encadrement.

Je voudrais remercier M. Pierre Yves Coulon, président du jury, ainsi qu'aux rapporteurs M. Moustapha Haphez et M. Stéphane Régnier, de m'avoir fait l'honneur d'évaluer mon travail et de participer au jury de cette thèse. Merci pour l'attention que vous avez portée à la lecture de mon manuscrit et pour les remarques et commentaires très pertinents.

Je tiens à remercier la région Rhône-Alpes qui a financé le projet qui a donné lieu à ces travaux de thèse ainsi que l'école doctorale EDISCE pour m'avoir permis de les effectuer et plus particulièrement à son directeur M. Jean-Luc Schwartz pour ses conseils et sa disponibilité.

Je remercie ensuite toute l'équipe du laboratoire ICA/ ACROE de m'avoir accueilli en tant que doctorante et m'avoir permis de franchir cette étape, notamment les directeurs Mme. Annie Luciani et M. Claude Cadoz. Ces remerciements s'adressent également à l'équipe du GIPSAlab spécialement au département d'automatique pour m'avoir accueilli pendant et après ma thèse.

Je souhaite également remercier mes collègues du laboratoire ICA/ACROE avec qui j'ai eu l'opportunité de partager de très bons moments : Bénédicte Hingant pour ses encouragements continuels et son aide à la préparation de ma soutenance, Maria Christou pour notre soutien mutuel pendant la fin de la thèse, Saman Kalantari, Olivier Tâche, Nicolas André et Jérôme Villeneuve pour toutes les discussions scientifiques, politiques, etc. Je tiens à remercier également ceux qui sont partis du labo avant moi : Kévin Sillam qui m'a beaucoup manqué à la fin de la thèse, Ali Allaoui qui m'a donnée beaucoup de conseils pour ma soutenance, ainsi que Julien Castet, Geoffrey Cerna, Nicolas Venant, Guillaume Foujanet et Martin Mahl. Je n'oublie pas Christophe Discours et Petr Fojcik avec qui j'ai eu l'opportunité de collaborer dans la salle « temps-réel » et surtout Nicolas Castagne qui m'a donné un grand soutien pour mes travaux sur le simulateur.

Je remercie également mes collègues doctorants du Gipsalab : Irfan Ahmad, Lizeth Torres, Jennifer Zarate, Marouanne Alma et tous les autres. Merci pour votre soutien et votre accueil, vous avez rendu mes séjours dans votre laboratoire très sympathiques malgré la charge de travail.

J'adresse mes remerciements à l'ancienne équipe d'ERGOS Technologies, Omar Ichem et Chirase Benali et particulièrement à Pang Ly avec qui nous avons beaucoup travaillé ensemble pour la conception et l'amélioration des systèmes haptiques.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'équipe de PHELMA pour m'avoir accueilli en tant qu'ATER et pour m'avoir permis de réaliser des enseignements lors de ma dernière année de thèse.

Merci à tous mes amis avec qui j'ai partagé des bons moments, en France et autour du monde, pour leurs encouragements, leurs messages, leurs appels et leurs visites. Un grand merci à Sandra Ju, Angelica, Carlos C., Laura, Pilar, Lucho, Gonzalo, Beto M., Beto S., Freddy et Juan Manuel et sur Grenoble à Carlos Prada, Joe, Kawtar, Raffaele, Antonio et Fanny.

Je tiens également à nommer quelques personnes qui m'ont beaucoup soutenu pendant différentes périodes de mes études : merci à Pascal et à toute sa famille pour m'avoir si bien accueilli lors de mon arrivé en France, ainsi qu'à Hervé et à M. Sergio Rodriguez pour toute leur aide. Je vous suis très reconnaissante.

Je tiens surtout à remercier ma famille qui m'a toujours soutenu malgré la distance, à mes parents grâce auxquels je suis ce que suis aujourd'hui et spécialement à ma mère qui a fait un long voyage pour assister à ma soutenance de thèse. A mon frère et à ma sœur pour être toujours là pour moi et pour m'avoir donné le bon exemple à suivre. A Henry pour m'avoir toujours encouragé et soutenu dans tous mes projets. A mon oncle, à ma tante et à mes cousines parce que grâce à vous j'ai eu une famille en France.

Enfin, j'adresse mes plus profonds remerciements à Mickaël pour son aide, son soutien inconditionnel et ses encouragements au cours de la réalisation de ce travail.

# Résumé

Les travaux décrits dans ce document abordent le problème du couplage dynamique homme-système haptique. Nous proposons une étude de ce couplage basée sur l'hypothèse d'un système hybride temporaire. Selon cette hypothèse, le système formé lors du couplage peut être considéré comme un système dynamique dont les deux parties ne peuvent pas être séparées. Ce sujet est pluridisciplinaire, se situant à l'intersection des sciences cognitives, de l'automatique et de l'haptique.

La première partie du document comporte un état de l'art sur l'analyse du couplage dans ces trois domaines, une description de la problématique et de la méthode à utiliser pour notre étude ainsi qu'une proposition des typologies du geste. Lors de cette étude du couplage, nous nous intéressons à un groupe de gestes particuliers, notamment le geste périodique et le geste passif dans une situation de simulation haptique ainsi qu'aux modèles d'interaction capables de les générer. La méthode générale, consiste à définir des approches pour la modélisation du couplage main-système haptique pour ensuite réaliser une analyse du système couplé en réalisant une acquisition des données du système lors du couplage et en utilisant des méthodes d'identification de paramètres issus de l'automatique pour caractériser les modèles.

La dernière partie, décrit la mise en place du dispositif pour l'analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique. Ce dispositif permet l'acquisition des données du geste pour l'analyse. Nous présentons également, l'étude réalisée sur le simulateur haptique afin d'établir l'équivalence entre les paramètres virtuels introduits et issus du simulateur et des paramètres physiques réels. Ensuite, nous décrivons l'analyse expérimentale des différentes situations de couplage proposées. Les expériences effectuées lors de cette étude ont été réalisées sur la plateforme temps réel ERGON\_X, conçue par l'ICA/ACROE. Les résultats de ces expériences ont permis de quantifier les modèles du geste et d'observer ses composantes, selon les modèles établis.

**Mots clés :** haptique, interface haptique, interfaces homme-machine, simulation temps réel, couplage homme-objet, couplage homme-système haptique, geste, modélisation physique, identification de paramètres.



# Abstract

The work described in this document deals with the problem of human-haptic system dynamic coupling. We propose a study of this kind of coupling based on the hypothesis of a temporary hybrid system. Under this hypothesis, the system formed during the coupling can be considered as a dynamic system in which the two parts that compose it cannot be separated. This is a multidisciplinary topic, situated at the intersection of cognitive science, automation and haptics.

The first part of this document includes a state of the art on the analysis of coupling in these three areas, the description of the problem and the methodology for the study as well as a proposal of gesture typology. In this study, we are interested in a particular group of actions, such as periodic movement and passive gesture in a situation of haptic simulation and also, in the interaction models able to generate them. The general method is to define the approaches for modeling the hand-haptic device coupling and then, to perform an analysis of the coupled system by acquiring system data during human-haptic system coupling and using parameter identification methods to characterize the models.

The final section describes the implementation of the device for the experimental analysis of coupling during simulation with haptic interaction. This device allows data acquisition for gesture analysis. We also present the study of the haptic simulator to establish the equivalence between virtual parameters introduced to and returned by the simulator and real physical parameters. Then, we describe the experimental analysis of different proposed coupling situations. The experiments performed for this study were performed using the real-time haptic system ERGON\_X, designed by ICA/ACROE. The results of these experiments were used to quantify gesture models and to observe its components, according to established models.

**Keywords :** haptic, haptic interface, human-machine interfaces, real time simulation, human-object coupling, human-haptic system coupling, gesture, physical modeling, parameter identification.





# Abréviations

**API** : Application Programming Interface  
**AST** : Art-Science-Technologie  
**CRM** : Clavier Rétroactif Modulaire  
**DMA** : Direct Memory Access  
**DSP** : Digital Signal Processor  
**EKBF** : Extended Kalman Bucy Filter  
**FIFO** : First In First Out  
**LSM** : Least Squares Method  
**LVDT** : Linear Variable Differential Transformer  
**PCI** : Peripheral Component Interconnect  
**SDRAM** : Synchronous Dynamic Random Access Memory  
**SRAM** : Static Random Access Memory  
**SNR** : Signal to Noise Ratio  
**TGR** : Transducteur Gestuel Rétroactif  
**THS** : Temporary Hybrid System  
**HPI** : Host Port Interface



# Introduction

---

1	Contexte	1
2	Problématique	2
3	Organisation du document	3

---

## 1 Contexte

Les travaux décrits dans ce document ont été effectués au sein du laboratoire ICA/ACROE dans le cadre d'un projet CIBLE financé par la Région Rhône-Alpes. Le laboratoire ICA<sup>1</sup> et l'ACROE<sup>2</sup> sont deux institutions associées dans le cadre d'un programme de recherche et développement en informatique musicale, en systèmes temps réel à retour d'effort et en synthèse d'images.

Le laboratoire ICA/ACROE travaille particulièrement sur la création artistique. Dans ce contexte, les travaux en informatique musicale et en synthèse du son ont créé le besoin d'un instrument virtuel. C'est ce besoin qui a conduit à l'utilisation des systèmes à retour d'effort et des interfaces haptiques dans ce domaine. En fait, un nouveau mode d'interaction personne-système est apparu ces dernières années avec l'usage des systèmes à retour d'effort et l'usage de la simulation multi-sensorielle interactive. La raison profonde de cette nouveauté est la nécessité d'introduire une relation physique tangible avec les objets du monde calculé appelés *objets virtuels*, à l'image de la relation physique ressentie lors de la manipulation d'objets réels.

Dans ce cadre, le laboratoire ICA/ACROE a développé une plateforme temps réel équipée d'un dispositif haptique modulaire, commercialisée actuellement par la société ERGOS Technologies<sup>3</sup>. Parmi les applications les plus remarquables de ces dispositifs se trouvent la simulation d'une corde de violon ainsi qu'une simulation des *nanomondes* utilisée dans l'enseignement des nanosciences.

Ces situations de simulation impliquent une interaction entre l'utilisateur humain et l'objet virtuel qu'il manipule via une interface haptique. L'intérêt se porte donc sur l'analyse du couplage entre ces deux parties interagissant, c'est à dire l'opérateur humain toujours présent et l'interface haptique lui permettant de manipuler l'objet virtuel.

L'analyse et la modélisation de l'interaction homme-système haptique sont fondamentales pour le développement d'interfaces haptiques de qualité ainsi que pour leur utilisation dans des tâches dynamiques où la modalité haptique est importante.

---

1. Informatique et Création Artistique. Laboratoire de Recherche de Grenoble INP.

2. Association pour la Création et la Recherche des Outils d'Expression. Centre de recherche subventionné par le Ministère de la Culture.

3. Start-up issue du laboratoire ICA/ACROE.

## 2 Problématique

Ces dernières années, nous avons observé un grand essor de l'haptique ainsi que de ses applications dans différentes disciplines. Selon [Hayward et al., 2004], en 2004, le nombre d'articles publiés contenant le mot *haptique* était proche de mille par an, toutes disciplines incluses, tandis que seulement dix ans en arrière, il n'y en avait qu'une douzaine.

Cette croissance rapide peut s'expliquer par le fait que l'haptique se situe dans l'intersection de plusieurs grandes disciplines, allant de la robotique, l'automatique (téléopération, télémanipulation) et les réalités virtuelles jusqu'à la médecine, les neurosciences, la psychologie expérimentale et les sciences cognitives. Ses applications les plus connues actuellement sont dans le domaine prépondérant de la réalité virtuelle dans lequel les dispositifs haptiques sont apparus comme un complément des dispositifs visuels. Dans ce domaine, l'haptique, les systèmes à retour d'effort et l'interaction multisensorielle, ont été introduits comme des interfaces homme-système complémentaires à la vision. Par la suite, le développement de nouvelles technologies pour les interfaces haptiques, l'intérêt grandissant pour la modalité haptique et la perspective d'introduire une relation plus tangible et physique avec l'objet virtuel ont généré de nouvelles exigences concernant les performances des dispositifs haptiques.

De la même façon que la technologie, les concepts ont évolué. Les interfaces haptiques dans les réalités virtuelles apportent non seulement de nouveaux stimuli complémentaires à la vision, mais réalisent également les conditions d'une *interaction enactive*. L'interaction enactive est basée sur les concepts de l'enaction et l'incorporation et consiste notamment en la capacité d'une personne à développer des stratégies sensorimotrices où l'objet se comporte comme une extension de son corps [Enactive Network, 2007]. Dans ce cas, l'interface haptique n'est pas seulement le canal des stimuli sensoriels et des actions motrices mais aussi le vecteur d'un couplage mécanique entre la main et l'environnement virtuel construit à partir d'un modèle physique. Cette propriété de l'interface haptique est particulièrement importante pour un domaine d'usage moins connu : la simulation multisensorielle pour les arts instrumentaux, spécialement dans l'informatique musicale et la synthèse d'images [Florens et al., 2006].

Ces nouveaux concepts d'enaction et d'incorporation guident le développement des systèmes haptiques et stimulent les recherches sur leur interaction. Cependant, pour être capable de développer ces systèmes de haute performance adaptés à des situations de couplage et permettant l'incorporation enactive, il est nécessaire de mieux comprendre le couplage homme-objet dans la situation naturelle, avec un objet réel, puis dans la situation de simulation haptique, avec un objet virtuel pour quelques tâches élémentaires représentatives.

Basée sur ces concepts nous proposons de considérer les mouvements gestuels produits lors de la manipulation d'un objet comme le résultat de l'évolution d'un système quasi-autonome. Celui-ci est défini pour une durée finie et est constitué d'une partie de l'homme et d'une partie de l'objet [Florens and Urma, 2006] [Florens et al., 2006].

Cette approche permet alors d'analyser le couplage homme-système haptique comme un seul et unique système c'est à dire ayant ses composantes inséparables. Cette approche est innovante car jusqu'à maintenant, l'analyse du couplage entre l'homme et le système haptique interagissant comme un seul système dynamique n'a jamais été prise en compte pour l'analyse de l'interaction homme-système haptique et pour la conception des systèmes haptiques. Ces deux questions reposaient principalement sur deux composantes différentes et complémentaires.

Dans un premier lieu, la plupart des études se sont concentrées sur les propriétés de *l'objet*, c'est à dire, le dispositif haptique et l'objet virtuel simulé. Dans ces cas, les critères de conception se sont basés sur la capacité du simulateur haptique à reproduire les propriétés de l'objet quelles que soient les propriétés propres à l'homme [Colgate and Brown, 1994]. La principale limite de cette approche est que le simula-

teur haptique est interactif, conçu pour être manipulé par l'homme. Il n'est donc pas possible d'effectuer une analyse des propriétés de l'objet s'il est séparé de l'homme. Nous avons ainsi besoin de manipuler l'interface pour obtenir des informations sur l'objet virtuel.

La deuxième approche complémentaire à la précédente, considère les propriétés propres à l'homme. Elle est liée au domaine de la psychophysique et de la perception dont le principal objet d'étude est l'homme. Elle considère que les propriétés de l'homme permettent de délimiter les besoins du système haptique, par exemple en matière de bande passante [Couroussé and Florens, 2007]. Cependant, cette approche présente des limitations symétriques à celles de l'approche objet, puisqu'il n'est pas facile de caractériser l'homme comme un système ouvert et d'observer ses invariants mécaniques.

Dans cette thèse, nous réalisons une étude du couplage basée sur l'hypothèse d'un système hybride temporaire, considérant le système couplé homme-système haptique comme un seul système dynamique. L'objectif est d'étudier ce système, de valider son existence et de le mesurer. Pour cette étude, nous proposons des modèles fonctionnels du couplage homme-système haptique et nous réalisons des expériences pour obtenir des données qualitatives et quantitatives sur ces modèles en utilisant une méthode d'identification des paramètres. La caractérisation de ces modèles de l'ensemble homme-système haptique constitue une première approche pour valider l'hypothèse de l'existence d'un système hybride temporaire et devrait nous permettre d'analyser les gestes de l'homme lors d'une situation de couplage avec interaction haptique.

Pour la réalisation des expériences, nous mettons en place un dispositif pour l'analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique, en utilisant le simulateur ERGON\_X, développé au laboratoire ICA/ACROE. Ces expériences se focalisent sur l'exécution des gestes périodiques et des gestes passif, définis à partir d'une typologie du geste.

Pour chaque situation spécifique, la méthode générale consiste en l'élaboration d'un modèle du système couplé homme-système haptique en accord avec le comportement de l'homme observé lorsqu'il est couplé à un objet déterminé puis en la mise en place de la simulation adéquate sur la plateforme utilisée. Grâce aux données acquises durant la simulation avec une interaction haptique, nous caractérisons le modèle proposé en utilisant des techniques d'identification de paramètres comme la méthode des moindres carrés.

### 3 Organisation du document

Ce document est structuré en deux parties. La première partie contient principalement le cadre théorique, la description de la problématique de la thèse, ainsi que la proposition de la méthode à suivre et des modèles pour l'analyse du couplage.

Dans le Chapitre 1, nous présentons un état de l'art sur le couplage homme-objet dans différents domaines, notamment dans l'haptique, l'automatique et la robotique ainsi qu'en perception et cognition, trois domaines qui s'entremêlent dans la réalisation de cette thèse.

A partir de cet état de l'art, nous proposons dans le Chapitre 2, une analyse de la problématique du couplage homme-environnement virtuel, en expliquant les motivations et la méthode générale utilisée pour l'étude du couplage.

Dans le Chapitre 3, nous proposons une étude sur la typologie du geste et sa classification selon différents critères tels que sa finalité et sa fonction. A partir de cette typologie, nous définissons les tâches à analyser lors des expériences.

Ensuite, dans le Chapitre 4, nous présentons des modèles théoriques fonctionnels du couplage homme-système haptique. Nous étudions également des méthodes d'identification de paramètres permettant de

caractériser ces modèles et nous validons l'utilisation de ces méthodes à partir des données issues de la simulation.

Dans la deuxième partie, nous traitons de l'aspect expérimental de notre étude en commençant dans le Chapitre 5 par la mise en œuvre d'un dispositif afin d'analyser expérimentalement le couplage en situation de simulation avec une interaction haptique. Nous décrivons d'une part le simulateur utilisé dans son état initial et d'autre part les modifications apportées. L'acquisition des données ainsi obtenues permettent de caractériser les modèles proposés dans le Chapitre 4. Nous décrivons également, l'étalonnage réalisé sur le simulateur afin de trouver la signification physique des données acquises ainsi que la correspondance entre les paramètres virtuels utilisés par le simulateur et les paramètres physiques réels.

Dans le Chapitre 6, nous présentons une série d'expériences réalisées permettant de caractériser les modèles de couplage proposés dans le Chapitre 4 et de valider la méthode d'analyse.

# Chapitre 1

## Analyse du couplage homme-objet : État de l'art

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Couplage homme-objet en perception et cognition</b>	<b>6</b>
2.1	La main comme organe de perception et d'exploration	7
2.2	Le couplage humain-environnement	7
2.3	L'enaction	8
2.4	L'incorporation	9
2.5	Le concept de « Présence »	10
<b>3</b>	<b>Couplage homme - objet en automatique et robotique</b>	<b>10</b>
3.1	De la main humaine à la main robotique	11
3.2	Contrôle du mouvement	12
<b>4</b>	<b>Couplage homme-objet en systèmes haptiques et interaction personne - système</b>	<b>13</b>
4.1	Interaction homme-objet dans l'haptique	13
4.2	Contrôle de la force de préhension	14
4.3	Mouvements de la main pour atteindre une cible	15
4.4	L'utilisation des outils	16
4.5	Le rôle des sens haptique et visuel dans l'exploration de l'environnement	17
4.6	L'approche d'un système hybride temporaire	17
4.7	Approches fonctionnelles dans la recherche en haptique	18
4.8	Interaction avec les dispositifs technologiques	19
<b>5</b>	<b>Synthèse de la problématique du couplage homme-objet</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>23</b>

---

### 1 Introduction

Pour étudier le couplage dynamique homme-système haptique, nous devons nous intéresser tout d'abord à la problématique générale du couplage homme-objet. Cette problématique n'est pas nouvelle. Elle a



été abordée à travers le temps dans différents domaines. Il nous paraît donc important d'analyser comment le sujet du couplage homme-objet a été abordé et quels ont été les domaines intéressés par cette problématique. Les premières études de la relation homme-objet ont concerné les sciences cognitives, dans lesquelles cette relation a été étudiée afin d'analyser la façon dont l'homme saisit un objet. Dans la robotique, les chercheurs l'ont également étudié afin de réaliser une modélisation du comportement pour la synthèse de l'humain, c'est à dire, pour réaliser des bras manipulateurs ou des mains robotiques capables de se comporter comme un homme. Cette synthèse a pu être réalisée soit en suivant les trajectoires de la saisie d'un objet soit en reproduisant la préhension de la main humaine. Nous retrouvons ici une relation entre la robotique et les sciences cognitives qui décrivent ces modèles comportementaux.

La pluridisciplinarité du sujet nous mène à réaliser un état de l'art sur le couplage homme-objet dans différents domaines. Cet état de l'art est une étude pluridisciplinaire qui entremêle des domaines allant des sciences cognitives vers l'automatique et la robotique et finissant avec l'haptique où se trouve l'intérêt principal de cette thèse. Nous avons divisé ce chapitre en trois parties en fonction de nos domaines d'intérêt et les compétences des laboratoires d'accueil :

- Couplage homme - objet en perception et cognition.
- Couplage homme - objet en automatique et robotique.
- Couplage homme - objet en systèmes haptiques et interaction personne - système.

Ce classement nous permettra d'analyser selon différents points de vue l'étude de l'interaction homme - objet en fonction de son domaine, et de connaître l'état d'avancement des recherches.

## 2 Couplage homme-objet en perception et cognition

Les sciences cognitives constituent un vaste domaine de recherche concernant plusieurs disciplines allant de la psychologie cognitive, l'intelligence artificielle, les neurosciences, la linguistique jusqu'à la philosophie [Dortier, 1999]. Comme défini dans [Hardy-Baylé, 2002], les sciences cognitives proposent un modèle de fonctionnement de la pensée afin de comprendre comment l'homme pense, communique, perçoit, mémorise, contrôle, prend conscience de son action, attribue des intentions, etc. Par exemple, les neurosciences, s'intéressent traditionnellement aux mouvements, aux sens comme la vision et l'audition, à l'apprentissage et aux maladies neurologiques comme l'Alzheimer et la maladie de Parkinson [Ehrensberg, 2004]. L'un des objectifs de l'étude du mouvement en neurosciences est de comprendre la façon dont l'humain contrôle et exécute ses mouvements. Cette analyse de la cinématique humaine est d'une grande importance pour la médecine, pour comprendre comment réparer les dommages médullaires, pour évaluer les performances des extrémités, pour diagnostiquer et traiter les maladies liées au mouvement, ainsi que pour concevoir des prothèses permettant de retrouver des membres fonctionnels.

Dans le cadre de l'analyse du mouvement, le contrôle du mouvement du bras et de la main reste l'un des sujets les plus étudiés. Son but est de comprendre la façon dont l'homme interagit avec son environnement. Cette interaction est complexe du point de vue neurologique et cinématique. En effet, comme décrit [Schaal, 2002], la plupart des mouvements humains peuvent être exécutés sous plusieurs formes. Par exemple, pour atteindre un objet, l'homme peut choisir un chemin arbitraire entre le point de départ et le point final où se trouve cet objet, et le chemin peut être traversé avec des profils de vitesse arbitraires. Il paraît donc peu probable que deux sujets adoptent des stratégies similaires pour accomplir le même objectif. Cependant, la recherche comportementale a trouvé un grand nombre de régularités, non seulement entre les individus d'une même espèce mais aussi entre des espèces différentes. Ceci semble indiquer l'existence de quelques principes organisationnels fondamentaux dans le système nerveux central [Schaal, 2002].

Dans le cadre de l'étude des mouvements de la main et du bras humain, nous nous intéressons aux études portées sur la relation main-objet.

## 2.1 La main comme organe de perception et d'exploration

Dans le domaine des sciences cognitives, la main est vue comme un organe de perception et d'exploration de l'environnement. Elle a donc une fonction perceptive et une fonction motrice.

Selon [Biagiotti et al., 2004], les deux habiletés principales de la main humaine sont la préhension et l'appréhension. La préhension est définie comme la capacité de la main à saisir et à tenir des objets de formes et de tailles différentes. L'appréhension est définie comme la capacité de comprendre à travers le toucher actif. Les auteurs de [Biagiotti et al., 2004] définissent ainsi la main comme un dispositif entrée-sortie : un dispositif de sortie lorsqu'elle applique des forces pour saisir les objets d'une façon stable ou pour les manipuler, et un dispositif d'entrée lorsqu'elle est capable de récupérer des informations sur l'état de l'interaction avec l'objet lors d'une tâche et peut explorer un environnement inconnu.

Dans [Gentaz, 2004], l'auteur définit la perception haptique comme « le résultat de la stimulation de la peau suite aux mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec des objets ». La main est alors définie avec une fonctionnalité perceptive et une fonctionnalité motrice. Ceci est une spécificité de la modalité haptique où la perception et l'action sont entièrement liées. La perception haptique intègre ainsi les informations cutanées et les informations proprioceptives et motrices liées aux mouvements d'exploration.

## 2.2 Le couplage humain-environnement

L'étude du couplage dans les sciences cognitives a été focalisée sur la façon dont l'homme interagit avec son environnement en général, c'est à dire, des objets ou d'autres hommes. Dans [Sheridan, 2002], l'auteur définit le couplage entre l'homme et l'environnement comme des interactions bidirectionnelles. La causalité entre l'homme et l'environnement peut alors être considérée comme arbitraire.

Dans [Sheridan, 2002], l'auteur décrit quatre types de couplage entre l'homme et l'environnement :

1. *Couplage physique ou force - position* : Le couplage physique ou le couplage force - position est défini comme l'interaction la plus naturelle entre l'homme et l'environnement mécanique. Cette définition est basée sur la loi de Newton. Comme la causalité entre l'homme et l'environnement est considérée arbitraire, nous trouvons deux cas de couplage force-position. Dans le premier cas, la force imposée par l'homme cause le déplacement d'un objet dans l'environnement, Figure 1.1 (a). Dans le deuxième cas, lorsque l'objet effectue un déplacement dans l'environnement, celui-ci cause une force, Figure 1.1 (b).
2. *Couplage perception-action* : Cette catégorie est basée sur les pensées du philosophe allemand M. Heidegger [Heidegger, 1977] et du psychologue américain J.J. Gibson [Gibson, 1979] afin de fournir un point de vue philosophique de la perception et de l'action humaine. Il s'agit du couplage action-perception entre l'homme et l'environnement. Selon Heidegger, il y a des situations où l'action est inévitable et le résultat de cette action est imprévisible et en changement continu. Dans l'utilisation normale d'un outil, par exemple un marteau, l'outil devient transparent pour l'utilisateur qui ne peut pas concevoir l'outil indépendamment. Cependant si une anomalie se produit, par exemple si le marteau glisse, il y a une rupture et l'outil peut alors être conçu dans l'esprit. Selon Heidegger, le sens d'être signifie une implication totale dans l'interaction dynamique : l'homme et l'objet ne sont pas causalement séparables.

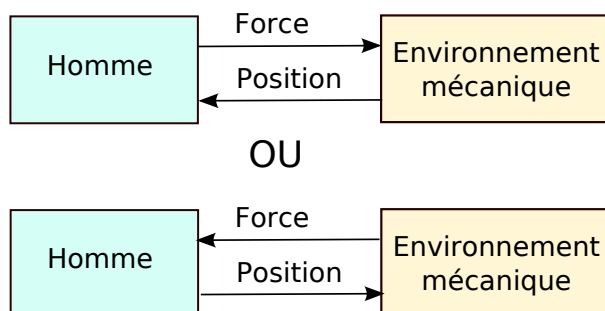


FIGURE 1.1 – Couplage force - position lors de l'interaction mécanique homme - environnement [Sheridan, 2002]. (a) La force imposée par l'humain cause le déplacement d'un objet dans l'environnement. (b) le déplacement effectué par l'objet dans l'environnement cause une force sur l'homme

Selon Gibson, la perception est l'acquisition de l'information qui supporte l'action, spécialement par rapport à ses contraintes [Sheridan, 2002] [Gibson, 1979]. La relation philosophique action-perception selon Heidegger et Gibson est présentée dans la Figure 1.2.

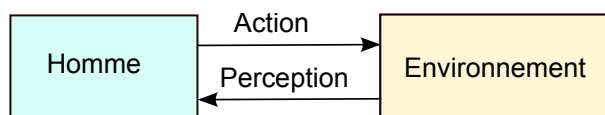


FIGURE 1.2 – Vue philosophique de l'action et de la perception humaine selon Heidegger-Gibson [Sheridan, 2002]

Ces concepts sont également liés aux concepts d'enaction et d'incorporation que nous décrivons dans la Section 2.3.

## 2.3 L'enaction

La théorie de l'enaction est basée sur les concepts définis par Jerome Bruner en 1966 dans le cadre ses recherches sur le développement cognitif des enfants [Bruner, 1966]. Bruner a proposé trois modes de représentation, c'est à dire, les informations ou les connaissances sont stockées et codées dans la mémoire sous trois formes :

- la représentation enactive basée sur l'action.
- la représentation iconique comme les informations acquises visuellement et stockées sous la forme d'images, de dessins ou de diagrammes.
- la représentation symbolique, basée principalement sur le langage, comme les informations stockées sous la forme de symboles ou de codes par exemple des mots ou des symboles mathématiques [McLeod, 2008].

Selon [Bruner, 1966], elles arrivent chronologiquement lors de l'apprentissage des enfants, d'où la définition du « cône de l'expérience » [Atherton, 2011], montré dans la Figure 1.3. La représentation enactive basée sur l'action permet, à la fois pour des adultes que des enfants, de se rappeler des actions qui ne peuvent ni être représentées par une forme iconique ni par une forme symbolique. En effet, certaines actions ne peuvent être représentées par des images ou des paroles mais pour lesquelles il faut avoir expérimenté l'action auparavant pour l'apprendre et la comprendre. Il y a des connaissances que nous ne pouvons ni acquérir ni représenter à l'aide d'images ou de symboles, mais pour lesquelles il est nécessaire de réaliser l'action. Ceci est le cas de la conduite d'une voiture ou d'un vélo où le savoir faire est principalement basé sur l'action. Ainsi pour apprendre à le faire, il faut l'avoir expérimenté.

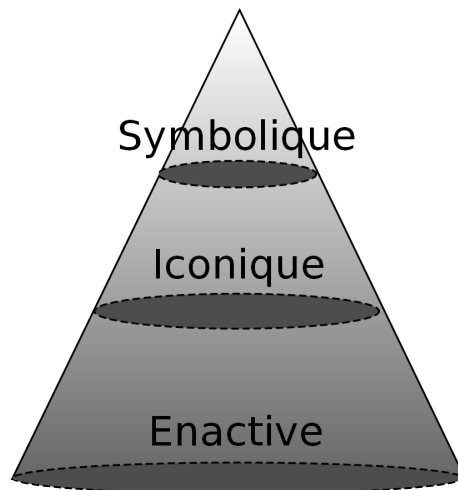


FIGURE 1.3 – Le cône de l'expérience [Atherton, 2011]

A partir de la définition de la représentation enactive proposée par Bruner, Varela, connu comme le père de l'enaction, propose et développe le concept d'enaction [Varela et al., 1991]. L'enaction est une approche récente en psychologie et en sciences cognitives et qui a été introduite dans le domaine des interfaces haptiques [Enactive Network, 2007]. L'enaction permet d'apprendre les comportements à adopter vis à vis de nouveaux systèmes. L'incorporation intègre la relation de couplage et permet de développer un comportement déjà connu et expérimenté par le corps. Dans le cas du système corps-objet, l'objet manipulé peut être considéré comme une partie du corps.

Le paradigme de l'enaction est enraciné dans la dynamique corporelle sensorimotrice [Stewart, 2007], et la connaissance enactive est basée sur les habiletés motrices, telles que la manipulation d'objets, ou l'action de faire du vélo [Pasquinelli, 2007]. Selon [Stewart, 2007], le principe de base de l'enaction est défini comme suit : « la cognition doit être définie comme le processus selon lequel un organisme vivant, en interaction avec son environnement, produit le monde dans lequel il vit ». Le couplage dynamique sensorimoteur entre un organisme et son environnement peut être considéré comme la base de l'enaction.

## 2.4 L'incorporation

Il existe plusieurs relations liant les hommes et les objets en termes d'incorporation. L'incorporation peut être définie comme la relation que la personne établit avec l'objet lorsqu'elle le saisit ou le manipule et le ressent comme une extension d'elle-même c'est à dire une partie de son corps [Fels, 2000]. Cependant, dans le domaine des arts et des technologies, Fels [Fels, 2000] définit en plus du cas où la personne incorpore l'objet, le cas réciproque où l'objet incorpore la personne. Dans le premier cas, la personne incorpore l'objet quand elle sent que l'objet est une extension d'elle-même. Dans le deuxième cas, la personne se soumet à la manipulation de l'objet.

A partir de ces définitions, l'auteur de [Fels, 2000] définit quatre types de relations selon la profondeur de l'incorporation de l'objet dans la personne ou de la personne dans l'objet :

- la personne communique avec l'objet,
- la personne incorpore l'objet,
- l'objet communique avec la personne, et
- l'objet incorpore la personne.

Nous nous intéressons aux deux premières catégories, où la personne incorpore l'objet. Le premier type correspond au cas où la personne exerce un contrôle sur le dispositif et obtient une réponse en retour. Le deuxième type correspond au cas où elle intègre l'objet et son comportement comme provenant d'elle-même, une extension de son propre corps et son propre esprit. Cette situation est familière aux opérateurs qualifiés, par exemple un peintre et son pinceau ou un musicien et son instrument.

## 2.5 Le concept de « Présence »

Le concept de « Présence » joue un rôle important dans l'étude de l'interaction entre l'homme et son environnement. Le terme présence désigne la sensation d'existence dans un environnement, c'est à dire, « d'être là » [Zahornik and Jenison, 1998].

Ce concept de présence issu des sciences cognitives est considéré comme un objectif important dans la conception de systèmes, notamment pour la réalité virtuelle et la téléopération. Selon [Flach and Holden, 1998], l'approche de Gibson [Gibson, 1979] fournit une base importante pour la définition de la présence et de l'immersion dans le cadre des environnements virtuels.

Le terme « Téléprésence », introduit par [Minsky, 1980], fait référence à une présence médiatisée. Le sujet a la sensation d'être présent dans l'endroit où il s'exécute la tâche et non dans l'endroit où il se trouve physiquement. Selon [Minsky, 1980], le plus important pour la téléprésence est d'avoir un retour sensoriel de grande qualité, ce qui devrait permettre à l'utilisateur de ne trouver aucune différence entre l'exécution d'une tâche à l'aide d'un dispositif et lorsqu'il exécute la tâche de ses propres mains.

## 3 Couplage homme - objet en automatique et robotique

Nous pouvons observer dans la nature l'évolution des fonctions motrices à travers le temps et les espèces. Les animaux ont développé des caractéristiques de locomotion très différentes pour s'adapter à leur milieu. Certains espèces ont également développé des organes leur permettant de saisir des objets. Cependant, l'homme est celui qui a développé les fonctions motrices les plus surprenantes, basés sur un système sensorimoteur très développé qui lui permet de marcher en utilisant les extrémités inférieures et d'utiliser ses extrémités supérieures pour interagir avec son environnement. Ce sont notamment ses mains qui lui permettent de manipuler tout type d'objets. Les chercheurs en robotique tentent de reproduire les caractéristiques physiques et surtout les fonctions motrices des hommes mais aussi de certains animaux [Patanè et al., 2007]. Le but est de concevoir des machines capables de se comporter comme un être humain pour l'aider ou pour le remplacer dans l'exécution de certaines tâches difficiles, complexe ou de longues durées, par exemple, pour porter des objets lourds, pour des tâches répétitives de production ou d'assemblage ou simplement pour réduire la main d'œuvre humaine. Des modèles de comportement humain ont été réalisés et analysés par des chercheurs en sciences cognitives et surtout par des chercheurs en robotique notamment dans le cadre de l'exécution et du contrôle du mouvement humain. Ces études sur le mouvement concernent principalement la locomotion humaine en générale. Les chercheurs en robotique ont cherché à reproduire la marche afin de concevoir des robots se déplaçant avec une marche bipède et le mouvement des extrémités supérieures notamment de la main, un organe polyvalent de perception et d'exploration. La capacité à manipuler plusieurs types d'objets de manière habile est une des caractéristiques distinctives des humains. Ce sont ces capacités de manipulation et de préhension qui ont été explorées dans la robotique [Chinellato and del Pobil, 2005] et qui ont motivé l'étude de l'interaction homme-objet.

### 3.1 De la main humaine à la main robotique

Les caractéristiques de la main humaine ont toujours été appréciées par les chercheurs en robotique. La propriété la plus intéressante de la main humaine est sa capacité à saisir une grande variété d'objets. Ceci a motivé les chercheurs à concevoir des mains robotiques inspirées des mains humaines. Dans [Biagiotti et al., 2004], les auteurs considèrent la main comme « le dispositif le plus habile créé par la nature pendant une évolution millénaire ». En effet, la main est l'exemple le plus connu d'un organe terminal effecteur habile. Elle est devenue un modèle pour la plupart des chercheurs dans le domaine de la manipulation robotique qui se sont intéressés à sa structure et à son système sensoriel. Cependant, il est encore difficile de produire de mains robotiques très proches de mains humaines, vue que le processus de saisie de la main humaine implique la coordination de plusieurs degrés de liberté ainsi que l'intégration des sens visuel et tactile [Lyons, 1985].

Lors de la conception des mains robotiques, plusieurs caractéristiques de l'humain ont été étudiées. Hormis l'intérêt porté sur la reproduction de la coordination et du contrôle de la main humaine, certains chercheurs se sont également intéressés à la conception de mains robotiques anthropomorphes, même dans des cas où cette condition n'est pas nécessaire à sa conception, comme dans le cas de certains robots industriels [Biagiotti et al., 2004].

L'anthropomorphisme peut être considéré comme une propriété importante dans la robotique en général et principalement dans la conception des mains robotiques. Selon [Biagiotti et al., 2004], le terme anthropomorphisme, dans le cadre des mains robotiques, fait allusion à « la capacité d'un effecteur robotique d'imiter la main humaine partiellement ou totalement, du point de vue de sa forme, de sa taille, de sa consistance et de son aspect général, par exemple sa couleur ou sa température ». Il lie la main à ses propriétés externes et non à ce qu'elle peut faire. Par contre, l'habileté est liée à sa fonctionnalité et non à sa forme.

Même si l'anthropomorphisme n'est ni nécessaire ni suffisant pour atteindre l'habileté, certains chercheurs pensent qu'il l'est souhaitable dans la conception des effecteurs robotiques pour les raisons suivantes [Biagiotti et al., 2004] :

- Dans un environnement orienté homme, il est convenable d'utiliser un effecteur anthropomorphe. Le robot peut exécuter différentes tâches de la même façon que l'homme grâce aux mêmes objets ou aux mêmes outils que ceux utilisés lors de la manipulation humaine et sans avoir les inconvénients liés à la taille ou à la forme des objets manipulés lors de l'interaction.
- Dans le cadre de la téléopération, si l'effecteur est anthropomorphe, l'homme peut le téléopérer facilement en utilisant un dispositif reproduisant directement sur l'effecteur les mêmes mouvements que la main de l'opérateur, par exemple un « data glove » [Fischer et al., 1998].
- Dans la robotique humanoïde, ces robots sont conçus à l'image de l'homme pour interagir avec eux. L'aspect et le comportement « humain » du robot sont nécessaires et jouent un rôle important dans les applications.

Selon les critères définis par [Biagiotti et al., 2004] et décrits ci-dessus, la réalisation de robots et notamment d'effecteurs anthropomorphes est fortement liée aux domaines d'application. Dans [Borst et al., 2003], les auteurs classifient de façon générale les mains robotiques selon leurs applications : des mains téléopérées et des mains ayant des tâches programmées. Dans le premier cas, l'opérateur utilise un système de téléopération pour contrôler la main robotique afin de réaliser des tâches dans un endroit où il ne peut pas être présent, par exemple un environnement dangereux ou un endroit lointain. Dans le deuxième cas, le robot réalise de manière indépendante des tâches qui lui ont été pré-programmées avec un certain nombre de paramètres variables pour s'ajuster à son environnement.

De nombreuses mains robotiques de caractéristiques différentes ont été développées au cours de ces dernières années [Borst et al., 2003]. Dans [Biagiotti et al., 2004], les auteurs présentent un état de l'art



ainsi que les tendances dans la conception et la commande des mains robotiques. Ils comparent un certain nombre de modèles de mains robotiques conçues entre les années 1979 et 2002 dans différents centres de recherche selon leurs niveaux d'anthropomorphisme. Ces niveaux se concentrent sur l'aspect, la structure mécanique et la dextérité résultante de la configuration cinématique, l'appareil sensoriel et le système de commande. Ils définissent une mesure quantitative de la « distance » entre un effecteur générique et l'objectif idéal que constitue la main humaine. Ils concluent que malgré la tendance vers le développement des mains robotiques humanoïdes, à ce jour, les résultats accomplis ne sont pas encore comparables à ceux de nos mains. De nos jours, les développements technologiques et la recherche en neurophysiologie fournissent de plus en plus d'outils pour construire des applications robotiques plus proches de la réalité biologique. Néanmoins, l'écart entre les performances de préhension humaines et celles des robots actuels est encore très large [Chinellato and del Pobil, 2005].

En effet, la manipulation fine et la préhension de petits objets sont encore des tâches difficiles pour les mains robotiques. Selon les recherches décrites dans [Borst et al., 2003], la cause n'est ni la qualité des capteurs ni celle de la commande, mais de la conception des doigts et plus spécifiquement des bouts des doigts. Le bout des doigts devrait être plus mou afin d'augmenter la robustesse et la stabilité lors de la préhension et la manipulation des objets.

### 3.2 Contrôle du mouvement

La plupart des activités que nous réalisons avec nos mains impliquent une interaction avec l'environnement. Cette interaction impose des forces sur la main et peut déstabiliser le mouvement [Tee et al., 2006]. Dans le cas du mouvement humain, le système nerveux central est capable de s'adapter à la dynamique de chacune des tâches exécutées. En effet, lors de l'exécution d'une tâche manuelle, l'homme a la capacité de s'adapter à celle-ci en ajustant la tension des muscles de la main et du bras pour n'importe quelle position afin de modifier l'impédance mécanique. Un exemple classique de cette adaptation est l'écriture, où l'humain maintient une force relativement constante et indépendante de la position pour maintenir le stylo en contact avec la surface sur laquelle il écrit [Sheridan, 2002]. Ces caractéristiques observées lors de cette interaction intéressent les chercheurs en robotique dans la conception des bras et des mains robotiques et les ont conduit à l'étude du contrôle du mouvement, et notamment du contrôle en impédance.

Dans [Hogan, 1992], l'auteur cherche à documenter et à comprendre les conséquences de l'interaction dynamique provoquée par le contact physique avec des objets. Il compare les performances de l'homme et des robots lors d'un contact. L'homme peut manipuler des objets sans aucun problème d'instabilité lors du contact alors que dans la robotique, le contact avec des objets peut causer un comportement instable. Il affirme alors que le contrôle d'impédance peut être utilisé dans un robot ou une prothèse pour éliminer l'instabilité au contact.

Dans [Tee et al., 2006], les auteurs introduisent un modèle simple de force et d'impédance formulé dans l'espace des articulations, comme le montre la Figure 1.4. Ce modèle décrit comment la force et l'impédance du bras nécessaires pour simuler son mouvement peuvent être calculées à partir des caractéristiques dynamiques de l'environnement. Il peut être utilisé pour simuler des mouvements tridimensionnels du bras ou de la jambe et pour concevoir la commande des robots et des interfaces homme - machine. Ce modèle suppose que le système nerveux central puisse apprendre avec succès la force et l'impédance nécessaires pour réaliser une tâche dans un environnement dynamique stable ou instable et que la raideur est linéaire à la magnitude du couple moteur de l'articulation.

Ce système a certaines limitations du fait qu'il a été développé en supposant que le système musculo-squelette ait des articulations simples. Il ne prend en compte ni la mécanique du muscle ni sa géométrie.

Il pourrait cependant être utilisé pour simuler le mouvement et il pourrait facilement être intégré dans la commande des interfaces haptiques.

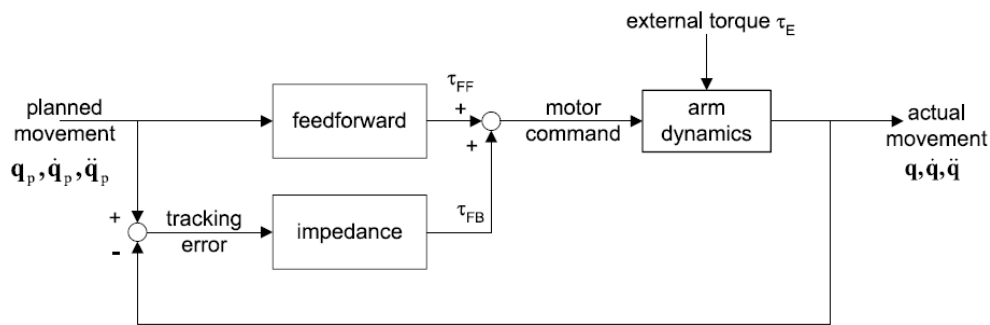


FIGURE 1.4 – Modèle de contrôle en impédance du bras [Tee et al., 2006]

Dans [Borst et al., 2003], les auteurs définissent trois stratégies de contrôle de la main et des doigts robotiques dans leur implémentations des mains robotiques anthropomorphes pour saisir un objet de façon robuste et stable. La première de ces stratégies est le contrôle de la raideur de l'articulation en équipant chacune des articulations des doigts d'un capteur mesurant le couple moteur et en contrôlant la raideur de l'articulation à partir du couple moteur et de l'erreur de position. La deuxième stratégie est le contrôle d'impédance cartésienne, utilisé quand un robot exécute une tâche de manipulation fine. Ils considèrent que le bout du doigt devrait se comporter comme un ressort programmable, mou dans la direction normale au contact et rigide dans les directions tangentielles. La troisième stratégie est le contrôle de saisie coordonnée. Ce type de contrôle est utilisé quand le robot saisit un objet seulement avec le bout des doigts pour maintenir le meilleur contact possible en présence de perturbations. Son principe de base est de trouver une relation entre les erreurs de position et de vitesse dans le contrôle de l'objet et d'implémenter un contrôle d'impédance dans la position et la vitesse de l'objet.

## 4 Couplage homme-objet en systèmes haptiques et interaction personne - système

### 4.1 Interaction homme-objet dans l'haptique

Le geste humain est polyvalent. Il permet à l'homme de réaliser une large gamme de tâches manuelles. Lorsque nous voulons effectuer ces tâches dans la cadre d'une simulation haptique, le problème de l'adaptabilité des interfaces surgit. En effet, les caractéristiques des tâches manuelles que l'homme peut réaliser ne peuvent pas être satisfaites par un seul dispositif haptique. Ceci explique l'existence de plusieurs formes de dispositifs selon l'application souhaitée. Dans certains cas, l'utilisateur humain saisit le dispositif haptique, dans d'autres il le porte sur son corps comme c'est le cas des exosquelettes ou des interfaces haptiques corporelles [Burdea, 1996]. Bien que des dispositifs haptiques peuvent être en contact avec n'importe quelle partie du corps de l'utilisateur, les dispositifs manuels ont été les plus largement utilisés et les plus développés jusqu'à aujourd'hui [Salisbury et al., 2004]. La principale cause est que les capacités sensorielles et de manipulation présentes dans la main ne sont pas aussi développées dans d'autres parties du corps. Cependant, les interfaces étant créées selon les applications souhaitées, il existe par exemple des interfaces de locomotion haptiques qui permettent de réaliser des mouvements avec les pieds ou de marcher dans des environnements virtuels [Schmidt, 2004]. Dans ce type d'applications, la question du contact homme-interface haptique reste un point important puisque lors de son



utilisation, il existe un contact permanent entre une partie du corps de l'utilisateur et l'interface qui lui donne un retour kinesthésique lors de cette interaction.

L'homme perçoit le contact avec les objets réels à travers des capteurs mécanorécepteurs situés dans la peau, les articulations, les tendons et les muscles. Selon [Salisbury et al., 2004], l'information tactile est acquise à travers des mécanorécepteurs situés dans la peau et l'information kinesthésique à travers ceux situés dans les articulations. Les forces d'interaction seraient donc perçues à travers une combinaison des deux.

Selon [Hayward et al., 2004], les dispositifs haptiques peuvent être considérés comme des robots ayant la fonctionnalité d'interagir avec l'homme. Dans [Salisbury et al., 2004], les auteurs donnent une définition également liée à l'interaction entre l'utilisateur et le dispositif haptique. Ils considèrent les dispositifs comme des petits robots qui échangent de l'énergie mécanique avec l'utilisateur. Les auteurs utilisent alors le terme interface dispositif-corps pour souligner la connexion physique entre l'opérateur et le dispositif à travers lequel l'énergie est échangée. Dans ce dispositif, le flux d'énergie est considéré bidirectionnel créant une boucle fermée incluant l'opérateur humain, le dispositif haptique, le rendu haptique et les algorithmes de simulation comme le montre la Figure 1.5.

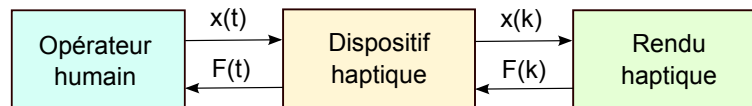


FIGURE 1.5 – Le dispositif haptique crée une boucle fermée entre l'opérateur humain et le rendu haptique [Salisbury et al., 2004]

Cette boucle présente un flux bidirectionnel d'énergie pouvant causer des problèmes de stabilité dûs aux pertes d'énergie de l'environnement. La présence de l'homme dans la boucle devient également un problème dans l'étude de la stabilité puisque le comportement dynamique de celui-ci ne peut pas être décrit par une simple fonction de transfert.

## 4.2 Contrôle de la force de préhension

Plusieurs études ont été réalisées afin d'analyser le contrôle de la force de préhension chez l'homme. Dans certaines d'entre elles, des interfaces haptiques ont été utilisées comme outil d'expérimentation [Mori et al., 2003] [Masataka et al., 2006].

Selon [Mori et al., 2003], lors de la saisie d'un objet, la surface de contact entre les doigts et l'objet est divisée en deux parties : la zone « de collage » où les doigts collent la surface de l'objet et la zone « de glissement partiel » où les doigts glissent sur la surface. Ces zones sont montrées dans la Figure 1.6. Lors de la saisie d'un objet, l'homme est capable d'incrémenter la force de préhension pour éviter que celui-ci glisse de ses mains. Cela est possible grâce aux signaux afférents des récepteurs tactiles qui détectent l'extension de la surface de glissement partiel. Dans les doigts de l'homme il y a quatre types de mécanorécepteurs, les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Pacini, les disques de Merkel et les corpuscules de Ruffini. De ces mécanorécepteurs les plus sensibles pour détecter l'état de la surface sont les corpuscules de Meissner. Ces mécanorécepteurs présents dans la main et liés à la réception des informations tactiles et kinesthésiques sont aussi liés au contrôle de la force de préhension lors de la saisie d'un objet. Les corpuscules de Meissner activent les signaux nerveux quand la zone de glissement partiel augmente et ceci provoque une augmentation de la force de préhension.

De nombreux dispositifs à retour d'effort ont été développés afin de donner à l'utilisateur des informations sur le contact avec l'objet à distance lors de téléopération. Ce retour d'effort donne des informations

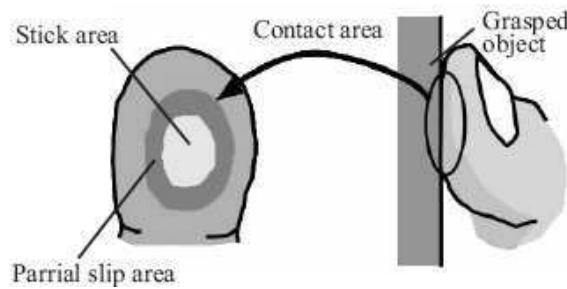


FIGURE 1.6 – Zone de contact entre le doigt et l'objet saisi. Distribution collage/glissement [Mori et al., 2003]

sur l'état du contact entre l'effecteur et l'objet manipulé mais ne permet pas à l'utilisateur de détecter le glissement entre l'effecteur et l'objet saisi, comme dans le cas de la préhension humaine. En effet, la direction de la force retournée est seulement normale à la surface de contact entre l'effecteur et l'objet. Les forces tangentielles doivent être prises en compte pour contrôler la force de préhension et éviter de laisser tomber l'objet. Basées sur ces considérations, dans [Mori et al., 2003], les auteurs proposent une méthode simulant le glissement partiel et générant des forces tangentielles sur la surface de la peau. Ils ont démontré que les réflexes de l'homme augmentent la force normale de la saisie. Cependant, ils n'ont pas démontré que l'incrément de la force de préhension était induit par les stimuli tactiles.

Dans [Masataka et al., 2006], les auteurs proposent une méthode pour contrôler inconsciemment la force de préhension de l'humain en générant sur le doigt des stimuli vibratoires distribués. Cette méthode est basée sur le réflexe de l'homme contre le glissement partiel lors du contact. Plusieurs capteurs tactiles ont été développés pour contrôler la préhension des mains robotiques en se basant sur la détection du glissement partiel. Les résultats obtenus montrent la possibilité que l'homme utilise indirectement la même information pour contrôler la force de préhension. Lors de la préhension, la force est induite sur une gamme de fréquences particulière. Les auteurs de [Masataka et al., 2006] considèrent que ces fréquences sont liés aux mécanorécepteurs détectant le glissement partiel. Ils considèrent que les stimuli vibratoires ayant une fréquence et une distribution appropriées génèrent une sensation virtuelle de glissements partiels et induisent un incrément de la force de préhension. Des expériences de préhension avec des stimuli de vibratoire distribués ont été réalisés en utilisant des ICPF (« Ionic Conducting Polymer gel Film »). Les fréquences de vibration effective utilisées étaient de 30 Hz ce qui correspond à la gamme la plus sensible des corpuscules de Meissner mais aussi de 5 Hz et 200 Hz, correspondant respectivement aux gammes les plus sensibles des corpuscules de Merkel et Pacini. Ils ont montré que le réflexe humain d'incrémenter la force de préhension augmente lors des stimuli vibratoires distribués à 30 Hz. Cela montre la relation entre la détection du glissement partiel et les corpuscules de Meissner. Ils ont confirmé que la distribution des stimuli a aussi des effets importants sur le réflexe de l'augmentation de la force de préhension.

### 4.3 Mouvements de la main pour atteindre une cible

Selon [Jordan and Wolpert, 1999], même s'il s'agit d'une tâche simple, lorsque l'homme déplace sa main pour atteindre une cible, il a un choix infini de chemins possibles et pour chacun de ces chemins il y a un nombre infini de profils de vitesse. De plus, après le choix du chemin et de la vitesse, chaque position de la main peut être atteinte par plusieurs combinaisons d'angles d'articulations et par l'action de différents muscles.

Cependant, même si les humains font des mouvements point-à-point dans l'espace libre, ils ont un choix

infini de trajectoires. Plusieurs études montrent que les sujets ont une tendance à choisir des trajectoires uniques, avec des caractéristiques invariantes. La première de ces caractéristiques invariantes concerne les chemins de la main dans des mouvements point-à-point. Ils ont une tendance à être droits et lisses. Par exemple, dans [Morasso, 1981], les auteurs ont observé que pour atteindre des cibles dans le plan horizontal les trajectoires de la main sont presque rectilignes. La deuxième caractéristique concerne les profils de vitesse de la trajectoire de la main ayant une forme de cloche [Morasso, 1981] [Svinin et al., 2005].

Même si les mouvements ont une tendance à être droits et lisses, des courbures importantes sont observées pour certains mouvements, en particulier des mouvements horizontaux ou près des limites de l'espace de travail [Soechting and Lacquaniti, 1981] [Schaal, 2002].

D'autres auteurs [Dingwell et al., 2003] [Svinin et al., 2005], ont proposé l'analyse de mouvements humains lors de la manipulation d'objets flexibles d'une position de repos à l'autre. L'objectif est de confirmer expérimentalement un modèle mathématique pour le contrôle humain de ce type d'objets. Ces analyses de mouvement ont été effectuées sur la manipulation des objets virtuels en utilisant des interfaces haptiques.

Dans [Svinin et al., 2005], les auteurs ont réalisé une analyse des mouvements humains pour atteindre une cible lors de la manipulation d'objets flexibles à l'aide d'une interface haptique afin de prédire la trajectoire de la main humaine. Il a été demandé aux sujets de réaliser un mouvement et d'arrêter l'objet virtuel, à l'aide d'une interface haptique. L'objet est connecté à la main à travers un ressort virtuel de longueur initiale zéro. Dans la configuration initiale, la main et l'objet sont dans la même position. Le protocole expérimental est présenté dans la Figure 1.7. Les sujets ont adopté des trajectoires très proches de celles prédites par leur modèle. Ils confirment l'utilisation d'un critère de « secousse minimale de la main » pour la prédiction dans la manipulation d'objets multi-masse.

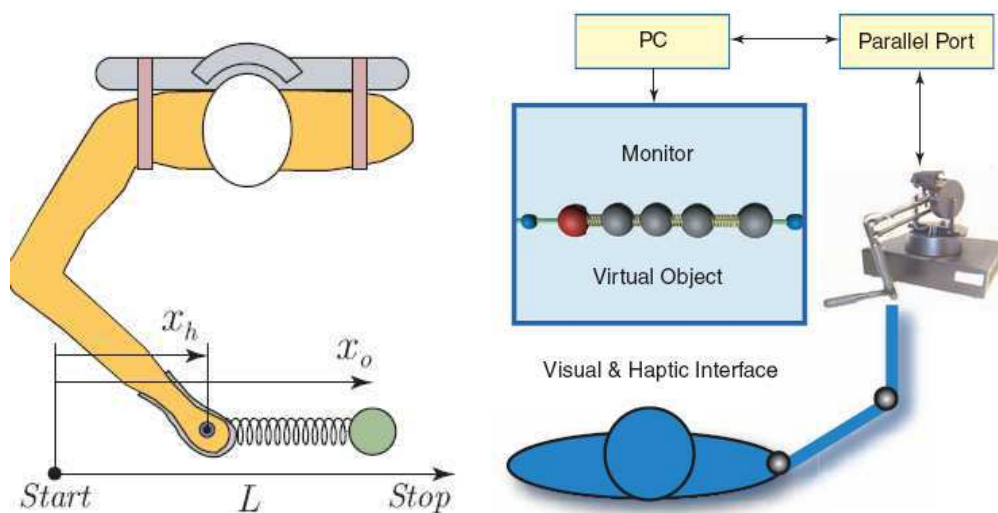


FIGURE 1.7 – Analyse des trajectoires lors de la manipulation d'objets flexibles [Svinin et al., 2005]. A gauche le mouvement réalisé. A droite la description générale du protocole expérimental

#### 4.4 L'utilisation des outils

La main est la partie du corps la plus importante pour l'interaction de l'homme avec l'environnement. Elle est étroitement liée à la perception et permet de toucher, de sentir et de manipuler des objets soit

pour explorer leur forme ou leur texture soit pour les déplacer d'un endroit à un autre ou pour réaliser une tâche déterminée. Pour la réalisation de certaines tâches, l'homme possède l'habileté de créer et de se servir d'outils. L'utilisation d'outils est une caractéristique distinctive du comportement moteur humain. Cependant, certains auteurs considèrent que cette caractéristique n'a pas complètement été comprise jusqu'à maintenant [Hogan, 1992]. L'utilisation de ces outils implique un contact physique entre celui-ci et l'homme. Il est alors important de comprendre les conséquences de l'interaction dynamique provoquée par le contact physique et les problèmes de contrôle et de coordination engendrés par leur utilisation. La manipulation et l'utilisation d'un outil requièrent fondamentalement un contact physique avec celui-ci. Pour cela, il est donc important d'analyser et de comprendre les conséquences de l'interaction dynamique provoquée par le contact physique avec des objets.

Dans le cadre de l'haptique, de nombreux interfaces et dispositifs ont été développés pour entraîner l'homme à manipuler de nouveaux outils ou des outils différents de ceux utilisés lors des activités courantes [Colgate et al., 1995]. Des dispositifs haptiques sont par exemple utilisés pour la formation de médecins à l'utilisation de nouveaux outils chirurgicaux, avant de les expérimenter sur des patients ou pour entraîner des astronautes à l'utilisation d'outils dans des conditions extrêmes comme lors de missions spatiales ou lors d'activités extra véhiculaires (EVA, « Extra Vehicular Activity ») [Carignan and Akin, 2003].

#### 4.5 Le rôle des sens haptique et visuel dans l'exploration de l'environnement

Les sens haptique et visuel jouent un rôle important dans la façon que l'homme explore l'environnement. La vision joue un rôle très important dans la perception de la rigidité de l'objet. Cependant, la quantification de la contribution du rendu visuel et haptique est encore indéfinissable. Des études ont été réalisées afin de définir comment l'information visuelle affecte la perception des propriétés haptiques de l'environnement. Dans [Sulzer et al., 2007], les auteurs présentent une approche pour mieux comprendre la façon dont les humains perçoivent la rigidité. Le protocole d'expérimentation consiste à demander aux sujets d'atteindre une cible dans une surface virtuelle de rigidité variable. Le curseur de position est déformé pour sembler plus rigide pour un groupe et moins rigide pour un autre. Pour le groupe de référence, il est utilisé sans déformation. Ils comparent alors les pentes de la relation force post-adaptation - rigidité pour quantifier l'effet de la déformation visuelle. Les résultats montrent qu'une surface plus rigide qu'elle ne le paraît a plus d'effet sur l'homme qu'une surface moins rigide qu'elle ne le paraît. Lors de tâches qui requièrent l'intégration de l'information visuelle et haptique, la vision domine le jugement au niveau de la taille, de la forme et de la position. Dans [Chinellato and del Pobal, 2005], les auteurs abordent également la relation entre la vision et la saisie d'un objet. Ils analysent la préhension basée sur la vision en comparant l'état de l'art sur ce sujet en robotique avec les découvertes récentes faites dans les neurosciences. L'un des aspects importants de la relation vision-saisie est que les processus visuels sont différents dans le cas où ils sont liés à la saisie d'un objet que dans d'autres cas.

#### 4.6 L'approche d'un système hybride temporaire

Dans [Florens et al., 2006] [Florens and Urma, 2006], les auteurs s'intéressent aux interactions instrumentales dans lesquelles le couplage homme-objet produit des phénomènes à haut fréquence, par exemple la saisie ou la collision. Pour l'analyse de ces interactions, les auteurs considèrent un système physique quasi-autonome constitué par une partie limitée de la mécanique de l'homme et une partie de l'objet. Ce système est appelé système hybride temporaire (THS). Il s'agit d'un système évolutif dont ses paramètres physiques découlent de plusieurs combinaisons entre les dynamiques de l'homme et de l'objet. La principale différence entre cette approche et les approches classiques est que le système à

analyser n'est plus ni l'objet manipulé ni l'homme qui le manipule mais le THS choisi, composé d'une partie de chacun des deux. Le THS peut être défini dans le cadre d'une situation de couplage naturelle entre l'homme et un objet réel ainsi que dans le cas d'une situation de couplage artificielle entre l'homme et un objet virtuel via une interface. Dans ce dernier cas, l'interface haptique est un maillon constitutif central du THS. Les Figures 1.8 et 1.9 montrent respectivement la représentation du THS en situation naturelle et en situation artificielle.

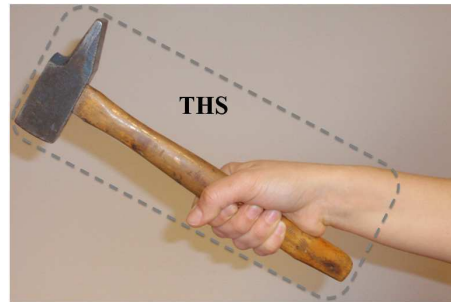


FIGURE 1.8 – Système hybride temporaire (THS) en situation naturelle

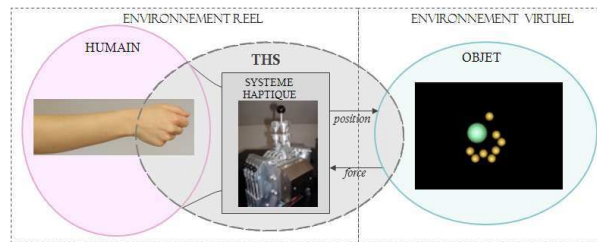


FIGURE 1.9 – Système hybride temporaire (THS) en situation artificielle

#### 4.7 Approches fonctionnelles dans la recherche en haptique

Dans [Couroussé and Florens, 2007], les auteurs proposent une classification des différentes approches fonctionnelles dans le domaine de l'haptique. Le terme *fonctionnel* fait référence au rôle ou à la fonction que l'interface haptique joue dans l'interaction homme - objet. La méthodologie est basée sur la comparaison entre l'interaction naturelle entre l'homme et son environnement et l'interaction artificielle entre l'homme et un environnement virtuel réalisée à travers une interface haptique. En situation naturelle, l'homme interagit directement avec un objet ou un environnement grâce au couplage mécanique. En situation artificielle, le dispositif haptique joue un rôle d'intermédiaire entre l'homme et le *monde simulé* à l'intérieur de l'ordinateur. Dans ce cas, le but du dispositif haptique est de réintroduire le couplage mécanique dans l'interaction.

Deux cas différents de situations artificielles sont définis. Dans le premier cas, l'objet ou l'environnement est virtuel. L'homme interagit avec l'objet ou l'environnement simulé à travers un dispositif haptique. Le deuxième cas est celui de la téléopération ou de la télémanipulation où l'objet est réel mais lointain et manipulé via une interface. Si nous considérons le couplage entre l'homme et l'objet du point de vue de l'homme, il n'y a aucune différence avec le cas de l'objet virtuel.

Dans ce qui suit, nous décrivons les approches fonctionnelles définies dans [Couroussé and Florens, 2007]. Elles sont illustrées dans la Figure 1.10.

- *Approche Objet* : Dans cette approche, l'observateur s'intéresse aux propriétés de l'objet indépendamment de celles de l'homme. L'objet est considéré comme une entité séparable de l'homme et il

est observé indépendamment depuis la frontière avec l'homme. En situation artificielle, l'interface est considérée comme faisant partie de l'objet.

- *Approche Homme* : Cette approche est symétrique à l'approche Objet. L'observateur s'intéresse à l'homme et mesure son comportement physique lors de la réalisation d'une tâche et lors de l'interaction avec l'environnement. L'homme est observé depuis sa frontière avec l'objet. En situation artificielle, les actions de l'homme sont transmises à l'objet via le dispositif haptique. Cette approche est liée au domaine de la psychophysique où le sujet d'étude est humain. La situation artificielle est alors considérée comme un moyen de fournir de nouveaux stimuli. Deux sous-catégories complémentaires sont mises en évidence dans cette catégorie. Dans la première sous-catégorie, la situation artificielle est considérée comme une situation nouvelle pour l'homme. Dans la deuxième, la situation artificielle est un nouveau moyen pour étudier les aspects psychophysiques de l'homme et le dispositif haptique est utilisé pour fournir des stimuli qui seraient difficiles de fournir avec des objets réels.
- *Approche Interaction* : Cette approche considère le couplage homme - objet comme un seul système dynamique. Elle est équivalente à l'approche d'un système hybride temporaire proposée dans [Florens et al., 2006] [Florens and Urma, 2006] et décrite dans la Section 4.6. En situation artificielle, le dispositif haptique est au centre du système observé et les caractéristiques de l'interaction sont liées aux propriétés mécaniques du dispositif haptique.
- *Approche Tâche* : Dans cette approche, l'observateur s'intéresse au système homme-objet en entier. Il observe l'évolution de ce système lors de l'interaction à différents niveaux comme la topologie du couplage, l'information fournie par les mouvements de l'homme, les caractéristiques physiques de l'objet avant, après et lors du couplage, etc.

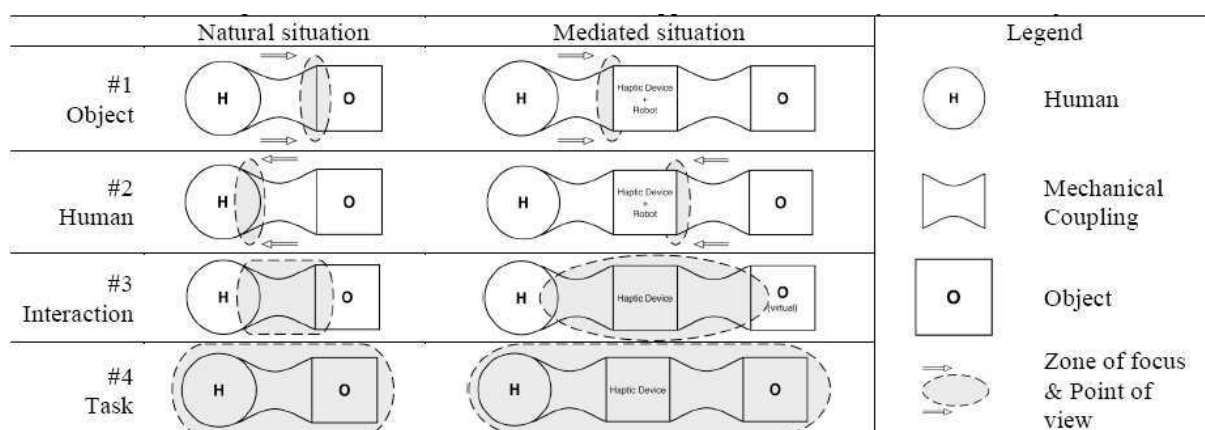


FIGURE 1.10 – Représentation des différentes approches fonctionnelles [Couroussé and Florens, 2007]

## 4.8 Interaction avec les dispositifs technologiques

Dans [Sheridan, 2002], l'auteur présente trois catégories supplémentaires sur le couplage, en relation avec l'interaction des dispositifs :

1. *Interaction de l'opérateur humain dans une boucle de contrôle simple* : Dans ce cas, l'homme est considéré dans une boucle fermée avec un procédé contrôlé à travers un dispositif. Le déplacement de la poignée du dispositif envoie un signal de contrôle au procédé qui retourne un effort à l'utilisateur. Le flux des signaux lors de cette interaction est montré dans la Figure 1.11, [Sheridan, 2002].
2. *Système d'aide à la décision sur ordinateur* : L'auteur de [Sheridan, 2002], souligne le rôle dual du système d'aide à la décision. Si l'utilisateur lui pose une question, il lui répond. Il est également



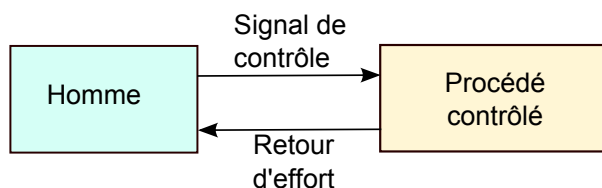


FIGURE 1.11 – Interaction de l'opérateur humain dans une boucle de contrôle simple [Sheridan, 2002]

en mesure de poser une question à l'utilisateur, d'obtenir une réponse et de modifier sa base de données. L'auteur signale une analogie entre cette catégorie et celle du couplage force-position où la force serait équivalente à la question venant de l'homme ou de la machine, et le déplacement serait l'équivalent de la réponse, (Figure 1.12).

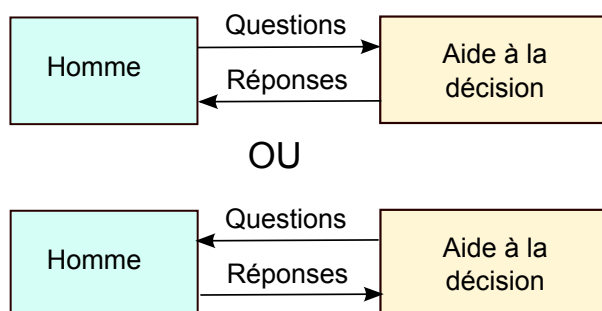


FIGURE 1.12 – Interaction humaine avec un système d'aide à la décision sur ordinateur [Sheridan, 2002].

(a) La question est posée par l'homme. (b) La question est posée par le système

3. *Interaction avec une interface électromécanique* : Selon [Sheridan, 2002], lorsque l'homme interagit avec l'environnement à travers une interface électromécanique, utilisée par exemple pour la simulation haptique ou la téléopération, il envoie un signal de force ou de position qui est transformé par l'interface en un signal de contrôle d'un procédé. Ce procédé contrôlé lui renvoie alors un retour d'état qui peut être un signal de force ou de position. Ce type d'interaction est présenté dans la Figure 1.13. Selon l'auteur, le couplage avec l'interface peut affecter le procédé de contrôle et inversement. Selon la masse et la viscosité du joystick de l'interface, le comportement du procédé contrôlé peut changer. Par exemple, s'il est très léger, il y a un danger de sur-contrôle et s'il est très lourd, le contrôle peut être trop mou. L'auteur se questionne également sur le problème de conception des télémanipulateurs maître-esclave. Le problème selon lui est comment concevoir ou permettre à l'opérateur d'ajuster l'impédance du bras maître et en même temps de concevoir l'impédance mécanique du bras esclave, puisqu'il est clair que les impédances du maître et de l'esclave ne peuvent pas correspondre à l'impédance du bras humain pour certains tâches. Deux exemples évidents sont le ramassage d'objets lourds ou l'exécution de tâches demandant une grande précision.

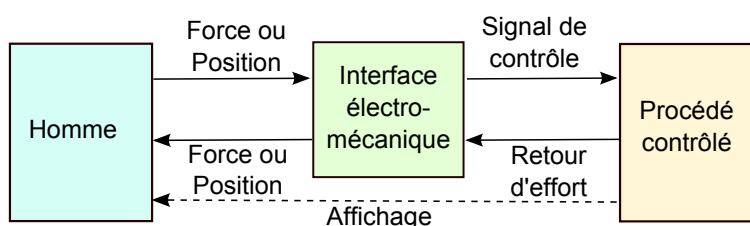


FIGURE 1.13 – Interaction haptique dans le contrôle d'un procédé dynamique [Sheridan, 2002]

Dans [Fishkin et al., 2000], les auteurs proposent de considérer les dispositifs électroniques portables, tels que les agendas et les livres électroniques, comme une partie de l'interface utilisateur. Cela permet à l'utilisateur de manipuler directement un dispositif physique-virtuel. Les concepteurs essaient aujourd'hui de reproduire avec ces dispositifs les tâches analogiques réelles. Le but selon [Fishkin et al., 2000], est que l'effet virtuel de la manipulation physique d'un dispositif électronique de poche soit similaire à l'effet physique lors de la réalisation de la tâche réelle. Tel est le cas des livres électroniques dont nous trouvons actuellement plusieurs modèles sur le marché. Leurs concepteurs essaient de créer un dispositif grâce auquel l'utilisateur aura l'impression de manipuler un vrai livre, par exemple, au moment de tourner les pages, etc. Ce type d'interaction où l'utilisateur réalise des tâches de manipulation ou d'écriture sur des dispositifs mobiles ont fortement été améliorées récemment grâce aux avancées des technologies des écrans tactiles ainsi qu'à l'intégration d'accéléromètres ou d'autres capteurs dans ces dispositifs.

## 5 Synthèse de la problématique du couplage homme-objet

A partir de l'état de l'art décrit dans ce chapitre, nous avons observé que l'étude du couplage est orientée d'une façon particulière selon chaque discipline. Cependant elle est toujours considérée comme fondamentale pour la relation entre l'homme, ou dans le cas de la robotique le robot, et l'environnement.

Dans les sciences cognitives, lors de l'étude du couplage homme-objet, les chercheurs s'intéressent particulièrement à la main, organe de perception. La main est en général vue comme un dispositif d'entrée-sortie [Biagiotti et al., 2004], comme défini dans la Section 2.1. Ce dispositif exerce sur l'objet une force lui permettant de le saisir et le manipuler mais qui reçoit également des informations sur l'interaction et notamment sur l'objet. D'autres définitions décrites dans la Section 2.2, se rapprochent de cette dernière et décrivent le couplage homme-environnement comme une interaction bidirectionnelle entre les deux avec une causalité arbitraire [Sheridan, 2002]. Les signaux ou les informations échangés lors de l'interaction dépendent de l'approche utilisée pour l'analyse du couplage. Par exemple, dans le cas d'une approche spécifique aux sciences cognitives, nous parlons d'un couplage action-perception. Cependant, dans tous les cas, le flux bidirectionnel et la causalité sont visibles dans leurs définitions, où l'homme et l'environnement sont analysés comme des systèmes séparés en se focalisant principalement sur le flux d'informations entre eux.

Quant à la robotique, il existe un besoin historique de s'intéresser au couplage, puisque le robot est un substitut de l'homme pour la réalisation de différentes tâches, à l'origine des tâches industrielles ou des tâches de téléopération dangereuses ou lourdes pour l'homme [Goertz, 1952] [Goertz and Thompson, 1954] [Flatau, 1969]. Les développements en robotique ont avancé et couvrent aujourd'hui des domaines très divers allant jusqu'aux tâches chirurgicales, pour assister les médecins lors des opérations les plus complexes ou requérant une grande précision [Taylor and Stoianovici, 2003]. L'assistance des personnes âgées ou handicapées est également une application. Ces assistants robotiques sont pour la plupart équipés d'une plateforme de communication et sont utilisés comme des dispositifs pour l'aide au déplacement, la réalisation de tâches ménagères et le transport d'objets [Hans et al., 2002].

Pour le développement de ces applications, l'étude du couplage est indispensable afin de créer des robots capables de reproduire les mouvements humains et notamment les capacités préhensiles de sa main afin de réaliser des tâches effectuées auparavant par l'homme. Dans ce contexte, il est également important d'étudier le contact entre la main humaine ou robotique et les objets [Hogan, 1992], comme décrit dans la Section 4. L'objectif est de concevoir des mains robotiques pouvant interagir avec des objets ou des surfaces présentant des caractéristiques physiques différentes, par exemple, rigides ou souples, de la même façon que la main humaine.



Les gestes humains ont également été étudiés en robotique, afin de pouvoir programmer un robot. Les applications sont nombreuses : reproduire un mouvement associé à une tâche particulière, suivre une trajectoire ou créer des robots pouvant être téléopérés à partir de mouvements humains [Borst et al., 2003]. Il existe également des études sur la reconnaissance des gestes afin de doter le robot d'une capacité de discernement entre les gestes réalisés par humain avec lequel il interagit et les gestes exécutés pour lui donner des ordres [Rogalla et al., 2002].

Dans le cadre de l'analyse du geste pour l'exécution d'une tâche, les chercheurs se sont intéressés principalement aux gestes naturels, c'est à dire les gestes avec lesquels la main interagit directement avec l'environnement. Dans le cas d'un geste outillé, où un outil est utilisé pour interagir avec l'objet, par exemple, un tournevis ou une pince, la robotique intègre directement le geste naturel associé à cet outil. C'est le cas des robots conçus pour l'industrie qui au lieu d'être dotés de mains capables de manipuler des pinces possèdent directement des effecteurs en forme de pinces, capables de réaliser simplement leurs fonctions. Nous détaillerons plus le geste dans le Chapitre 3.

En haptique, le couplage implique une interaction soit entre l'homme et l'objet réel dans le cas de l'interaction naturelle, soit entre l'homme et l'objet virtuel dans le cas de l'interaction artificielle. Les termes haptique et perception haptique sont étroitement liés à la peau et particulièrement à la main, connue comme l'organe le plus sensible de notre corps [Gentaz, 2004]. Dans les technologies des dispositifs haptiques, nous retrouvons également une définition de l'interaction comme un flux bidirectionnel. Dans plusieurs cas, ce flux est défini comme un flux d'énergie entre l'utilisateur et le dispositif [Salisbury et al., 2004], comme décrit dans la Section 4.1.

D'autres études ont été menées afin d'analyser les mouvements de l'homme pour atteindre une cible constituée par un objet flexible, à l'aide d'une interface haptique [Svinin et al., 2005]. Les chercheurs se sont également intéressés à une caractéristique importante lors du couplage : la force de préhension. Des expériences ont été réalisées à partir des connaissances physiologiques en utilisant des dispositifs haptiques [Mori et al., 2003] [Masataka et al., 2006].

Dans la Section 4.7, nous avons décrit les approches fonctionnelles proposées dans [Couroussé and Florens, 2007], où les auteurs présentent une analyse de la fonction de l'interface haptique dans l'interaction homme-objet. Le concept d'interaction artificielle, faisant référence à l'interaction entre l'homme et l'objet virtuel via une interface, est donc introduit. Les auteurs de ces approches fonctionnelles comparent l'interaction naturelle, c'est à dire celle qui se fait entre l'homme et l'objet directement grâce au couplage mécanique, avec l'interaction artificielle réalisée via une interface. Les auteurs définissent quatre approches possibles d'interaction, tant dans les cas naturels qu'artificiels. Parmi ces approches, nous pouvons citer les approches Homme et Objet où l'observateur s'intéresse soit à l'homme soit à l'objet indépendamment l'un de l'autre, l'approche Interaction où les parties concernées dans le couplage sont considérées comme un seul système dynamique et l'approche Tâche où le système homme-objet est observé en entier et à différents niveaux.

La problématique du couplage posée dans cette thèse est basée principalement sur ces approches fonctionnelles [Couroussé and Florens, 2007]. Nous nous intéressons principalement au couplage artificiel, entre l'homme et un objet virtuel via une interface haptique. Dans ce cas, le dispositif haptique se retrouve au centre du système observé et les caractéristiques de l'interaction sont donc liées aux propriétés du dispositif haptique utilisé. Pour cette étude du couplage, nous nous basons sur l'approche Interaction, qui considère le couplage homme-objet virtuel, ainsi que l'interface faisant le lien entre les deux, comme un seul système dynamique. Ce concept de deux systèmes couplés considérés comme un seul système est issu de l'approche du THS proposée par [Florens et al., 2006] et décrite dans la Section 4.6. L'approche du THS intègre les concepts d'enaction et d'incorporation décrits dans la Section 2.3.

Dans l'étude du couplage, nous sommes amenés à considérer le geste non pas comme un signal, un flux

d'information ou d'un flux d'information bidirectionnel mais comme un système physique temporaire. Les concepts d'enaction nous amènent à considérer le geste comme un système et non comme un signal. La principale cause est due au concept de l'incorporation impliquant l'indissociabilité entre une partie de l'homme et une partie de l'objet. L'analyse du couplage relève ainsi de l'analyse d'un système et non de l'analyse de signaux ou d'information.

## 6 Conclusion

L'état de l'art sur le couplage homme-objet présenté dans ce chapitre décrit l'état d'avancement des recherches sur ce sujet dans les domaines des sciences cognitives, de l'automatique, de la robotique et de l'haptique ainsi que leur orientation. Nous avons observé que les études du couplage et de la perception dans les sciences cognitives restent indissociables des domaines technologiques. Un grand nombre d'études menées en sciences cognitives sont utilisées dans d'autres domaines comme les réalités virtuelles ou la téléopération. Le concept de présence en est le parfait exemple. Ces études sont également utilisées pour la conception d'interfaces de téléopération ou haptiques plus adaptées à l'homme.

Après avoir réalisé cet état de l'art sur le couplage homme-objet, nous allons, dans le chapitre suivant, nous focaliser sur ce couplage en situation de simulation haptique. Nous présenterons la problématique de notre étude ainsi que la méthode à suivre pour la réaliser. Ensuite, dans le Chapitre 3, nous aborderons un aspect lié au couplage et à l'interaction avec l'environnement : le geste. Nous présenterons une typologie du geste qui nous permettra de choisir des tâches pour les expériences sur le couplage.



## Chapitre 2

# Couplage homme-environnement virtuel

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>Catégories de couplage</b>	<b>26</b>
2.1	Couplage homme-objet en situation naturelle	28
2.2	Situation médiatisée : Couplage entre l'homme et l'environnement virtuel	28
<b>3</b>	<b>Modélisation du couplage</b>	<b>30</b>
3.1	Notion de force	30
3.2	Notion électrique	31
<b>4</b>	<b>Problématique du couplage dans le contexte de la simulation haptique</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>Analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique</b>	<b>33</b>
5.1	L'interface haptique comme support du couplage homme-environnement virtuel	34
5.2	Approches pour l'analyse du couplage homme-environnement virtuel	36
5.3	Méthode pour l'analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique	38
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>

---

## 1 Introduction

Nous nous intéressons à l'étude du couplage dynamique entre l'homme et l'interface haptique utilisée pour interagir avec un objet virtuel simulé.

Dans le Chapitre 1, nous avons proposé un état de l'art du couplage homme-objet dans les domaines de l'haptique, de l'automatique et de la robotique ainsi qu'en perception et cognition. Cette analyse nous donne une orientation sur la démarche à suivre pour l'étude du couplage. Cependant, avant de l'entreprendre, nous allons dans ce chapitre, expliquer la problématique du couplage homme-système haptique, ses motivations et son importance ainsi que les approches utilisées.

Dans ce chapitre, nous examinons différents aspects propres au couplage dans des situations conçues de manipulation d'objets simulés, en exploitant l'analyse de l'état de l'art du couplage proposée dans le Chapitre 1.

L'analyse du couplage en simulation avec une interaction haptique pose de nouveaux problèmes par rapport au couplage homme-objet réel, puisque dans ce cas les objets sont réalisés par simulation et se trouvent dans l'environnement virtuel. L'interface haptique est donc nécessaire pour établir leur couplage. A cela s'ajoutent de nombreuses contraintes : l'interface haptique n'étant pas transparente, la transmission des signaux donc sa causalité et le traitement de ces signaux réalisé sur des signaux échantillonnés.

Nous commencerons par une définition des catégories du couplage selon deux critères importants : la nature des parties interagissantes et l'environnement dans lequel elles se trouvent. Une analyse des propriétés du couplage est alors proposée puis une analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique.

Nous approfondirons également les notions « d'haptique » et « d'interfaces haptiques » en commençant par la compréhension de leur fonctionnement. Un point sur les performances des systèmes haptiques et les caractéristiques prises en compte pour l'évaluation de ces performances sera fait. Nous traiterons également le rôle des concepts d'enaction et d'incorporation, introduits dans le Chapitre 1, en soulignant l'importance de l'étude du couplage pour la conception de systèmes haptiques favorisant l'enaction et l'incorporation lors de leur utilisation.

Pour finir, nous choisirons les approches pour l'analyse ainsi que la méthode à suivre.

## 2 Catégories de couplage

En complément de l'état de l'art présenté dans le Chapitre 1, nous allons maintenant considérer différentes catégories de situations de couplage : d'une part suivant la nature des deux parties interagissantes homme/objet et d'autre part, s'il s'agit d'une entité réelle ou simulée. En premier lieu, nous devons identifier quelles sont les deux parties couplées. Le cas classique qui nous vient en premier à l'esprit est celui de l'interaction entre un homme et un objet. Cependant, il existe également le couplage mécanique homme-homme, par exemple entre deux personnes qui se tiennent la main, et un cas plus simple mais également important de couplage entre deux objets, comme observé dans le Tableau 2.1.

Le couplage objet-objet peut être considéré comme la forme la plus simple de couplage. Dans des situations quotidiennes, deux objets réels peuvent être couplés l'un à l'autre. Plusieurs cas peuvent être définis selon la façon dont ce couplage est effectué.

Un premier cas se produit lorsque un objet est posé sur un autre, par exemple, un verre posé sur une table. Il peut s'agir d'un couplage non permanent (voir Chapitre 3, Section 5.1.2), selon la période de temps définie, et réversible, en enlevant le verre de la table.

Un deuxième cas est observé lorsque deux ou plusieurs objets sont réunis pour créer un nouveau. Le couplage constitue alors une action structurante permettant de passer de plusieurs objets à un seul et unique objet. Nous pouvons prendre comme exemple l'assemblage de blocs de Lego® pour former une figure considérée ensuite comme un seul et unique objet. Ce couplage peut également être décrit comme non permanent ou permanent, selon la période de temps définie, et il reste réversible.

Un troisième cas, très proche du deuxième, se produit lorsque deux ou plusieurs objets sont assemblés pour créer un nouveau mais pour ce faire l'un des objets est modifié par l'autre. Il est observé, par exemple, lorsqu'un clou est enfoncé sur une porte. Nous pouvons le défaire en enlevant le clou mais les propriétés de la porte auront été modifiées.

Tous les cas décrits ci-dessus impliquent des forces de frottement ainsi que des transferts d'énergie, de la même façon que le couplage homme-objet que nous verrons par la suite. Les connaissances que nous utilisons pour la modélisation du couplage de la Section 3 découlent du couplage objet-objet. En effet, ce

INTERACTEUR 1	INTERACTEUR 2
Objet	Objet
homme	Objet
homme	homme

TABLEAU 2.1 – Possibilités de couplages entre deux interacteurs (homme et/ou objet)

sont les connaissances de la physique sur les couplages entre objets qui sont généralement utilisés pour la modélisation homme-objet.

Ensuite, nous identifions l'environnement dans lequel se trouve chacune des parties interagissantes. Comme observé dans l'état de l'art, l'homme interagit avec des objets de son propre environnement pour les explorer, les manipuler ou les modifier. Cependant, dans certaines situations et notamment dans le cadre de la simulation, de l'haptique et des réalités virtuelles, l'homme et l'objet manipulé se trouvent dans deux environnements différents. L'homme se trouve dans son environnement considéré comme réel et l'objet se trouve dans un environnement simulé appelé environnement virtuel. L'homme interagit avec cet environnement virtuel et donc manipule des objets virtuels qu'à travers des interfaces.

L'environnement réel est considéré comme tout ce qui existe physiquement, c'est à dire l'homme et les objets qu'il peut toucher et explorer directement. L'environnement virtuel est, quant à lui, un concept propre au domaine des réalités virtuelles. Il s'agit de celui du simulateur, constitué d'algorithmes et de calculs effectués en temps réel. Les origines des représentations de l'environnement virtuel sont très diverses. Il peut être construit à l'image de l'environnement réel. Il peut s'inspirer du monde réel avec des modifications permettant, par exemple, la représentation de phénomènes physiques invisibles [Fuchs et al., 2006]. Un exemple de ce type de représentation est le scénario de simulation haptique « Toucher les Nanomondes » [Marlière, 2006], une interface de réalité augmentée permettant d'interagir avec l'environnement du nanomonde. L'environnement virtuel peut également être basé sur des concepts symboliques, par exemple, des informations schématiques permettant à l'utilisateur de mieux comprendre l'environnement. Enfin l'environnement virtuel peut aussi être irréel c'est à dire inspiré par l'imagination.

	OBJET RÉEL	OBJET VIRTUEL	HOMME RÉEL	HOMME VIRTUEL
OBJET RÉEL	1	2	3	4
OBJET VIRTUEL	-	5	6	7
HOMME RÉEL	-	-	8	9
HOMME VIRTUEL	-	-	-	10

TABLEAU 2.2 – Possibilités de couplages entre deux interacteurs (Homme et/ou Objet) selon leur environnement réel ou virtuel

La considération de l'environnement virtuel élargit les possibilités de couplage.

Des objets réels peuvent également être couplés à des objets virtuels via une interface. Leurs propriétés de couplage doivent alors être analysées de façon plus exhaustive, comme nous le ferons dans la Section 4.

L'homme peut aussi être virtuel, dans le sens de la simulation ou comme la robotique, il peut s'agir d'un substitut de l'homme.

En déclinant tous ces cas, nous obtenons 10 catégories possibles, détaillées dans le Tableau 2.2 :

1. Objet réel - Objet réel : Le couplage très habituel entre deux objets réels. Par exemple, deux objets assemblés pour former un troisième.

2. Objet réel - Objet virtuel : Cas d'objet hybride en haptique. Les propriétés de ce type de couplage seront décrites dans la section 4.
3. Homme réel - Objet réel : Situation naturelle de couplage mécanique homme-objet. Par exemple, la manipulation ou l'utilisation d'outils et d'instruments par l'homme.
4. Homme virtuel - Objet réel : En robotique, le robot peut être considéré comme un homme virtuel, couplé à un objet réel. Il s'agit du paradigme classique de la robotique.
5. Objet virtuel - Objet virtuel : Il s'agit d'un couplage dans le cadre de la simulation.
6. Homme réel - Objet virtuel : Ceci est le cas classique de l'haptique, un couplage médiatisé via une interface ou une situation instrumentale simulée.
7. Homme virtuel - Objet virtuel : Comme dans le cas où les deux objets sont virtuels, ils s'agit d'un cas de simulation.
8. Homme réel - Homme réel : Cas de couplage mécanique interpersonnel. Par exemple, deux personnes qui se serrent la main.
9. Homme réel - Homme virtuel : Il peut s'agir d'un couplage dans le cadre d'une simulation mais également d'une interaction entre un homme et un robot.
10. Homme virtuel - Homme virtuel : Cas de simulation.

Ces classifications sont importantes dans le cadre de cette étude puisqu'elles nous permettent de cibler une catégorie spécifique : le couplage homme-objet virtuel en situation médiatisée. Nous nous intéresserons plus particulièrement, dans les paragraphes suivants, aux catégories 3 et 6, c'est à dire au couplage homme-objet en situation naturelle ou en situation médiatisée.

## 2.1 Couplage homme-objet en situation naturelle

En situation naturelle, l'homme interagit directement avec un objet ou un environnement grâce à un couplage mécanique [Couroussé and Florens, 2007]. Il réalise un geste pour toucher ou saisir directement l'objet afin de l'explorer, de le déplacer, de le modifier ou de l'utiliser pour réaliser une tâche. Poser la main sur une table et saisir une balle constituent des exemples de couplage en situation naturelle, indépendamment du geste effectué. Pour qu'un couplage mécanique entre la main et un objet puisse se produire, il est nécessaire qu'ils aient des caractéristiques précises favorisant le couplage, notamment en termes de forme et d'adhérence. Le couplage homme-objet est non permanent et réversible pour l'homme. Cependant, celui-ci peut modifier les propriétés ou détruire un objet en le manipulant.

Lorsque l'objet est considéré comme un instrument, la situation naturelle est vue de la même façon qu'une situation instrumentale. Elle est caractérisée par la mise en relation de deux systèmes mécaniques mutuellement couplés, d'une part l'opérateur humain et d'autre part l'instrument manipulé [Gibet, 1987].

## 2.2 Situation médiatisée : Couplage entre l'homme et l'environnement virtuel

La situation médiatisée est analogue à la situation naturelle, mais dans celle-ci l'objet manipulé est un objet virtuel. L'interface joue le rôle de médiateur entre l'homme et l'environnement simulé par l'ordinateur [Couroussé and Florens, 2007]. Elle est alors considérée comme un maillon constitutif du système couplé (Figure 2.1).

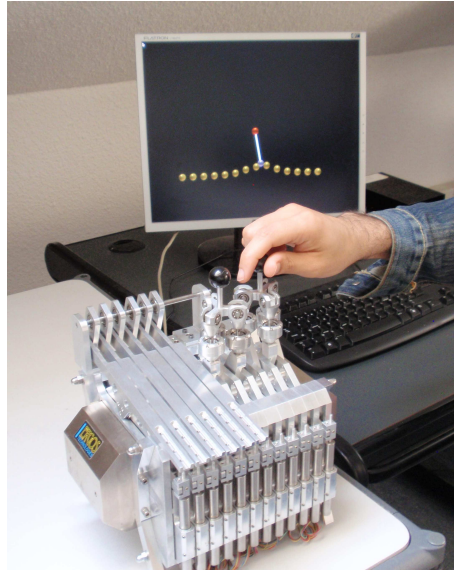


FIGURE 2.1 – Couplage en situation artificielle

La situation instrumentale peut également être transposée au cas de la situation médiatisée. L'instrument réel est alors remplacé par un simulateur. Cependant, l'instrument virtuel est toujours perçu par l'opérateur comme un objet avec des caractéristiques pouvant être très proches à celles de l'objet physique réel [Gibet, 1987].

La boucle « perception, cognition, action » en situation médiatisée peut également être observée. L'utilisateur agit sur l'environnement virtuel à travers une interface motrice capable de capter ses actions, ses gestes et ses déplacements et de les transmettre à un ordinateur qui les interprète comme une demande de modification de l'environnement. Le ordinateur effectue alors les modifications demandées à l'environnement virtuel et transmet les retours sensoriels aux interfaces [Fuchs et al., 2006] sous la forme d'images, de sons ou de forces (Figure 2.2).

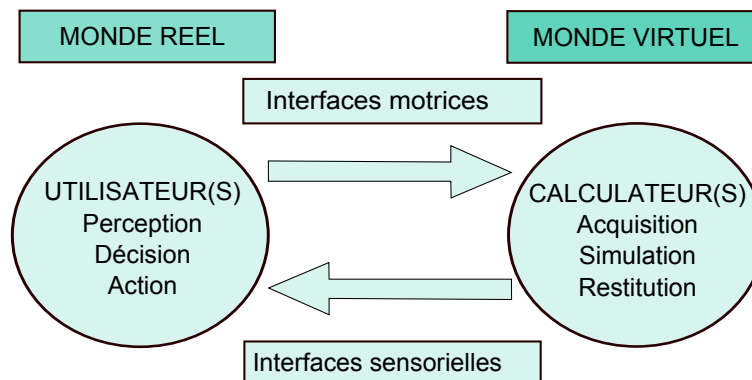


FIGURE 2.2 – La boucle « perception, cognition, action » en situation médiatisée [Fuchs et al., 2006]

Comme expliqué par les auteurs [Fuchs et al., 2006], deux contraintes majeures vont perturber cette boucle. La première contrainte est la latence c'est à dire le délai entre le moment où l'information est envoyée et celui où elle est reçue. En situation médiatisée, nous pouvons parler du décalage temporel entre l'action de l'utilisateur dans l'environnement virtuel et sa réponse sensorielle [Fuchs et al., 2006].

La seconde contrainte est la présence de l'homme dans la boucle. Celle-ci conduit souvent le système à des critères d'opération inusuels à cause de sa sensibilité aux imperfections techniques telles que le bruit



des actionneurs [Florens et al., 2006]. En effet, les conditions de couplage en situation naturelle ne sont pas parfaitement reproductibles en situation artificielle. En situation naturelle, nous ne constatons pas de problèmes particuliers de stabilité sauf dans certains cas spéciaux de tremblement pathologique, comme la maladie de Parkinson ou d'autres dysfonctionnements cérébelleux produisant des troubles du contrôle moteur [Gallego et al., 2010]. En situation médiatisée, nous constatons des problèmes de stabilité dans la boucle. Comme décrit dans [Fuchs et al., 2006], ces problèmes sont principalement causés par la latence dans la boucle et sont donc l'effet de la causalité. Nous approfondirons ces aspects dans la Section 5.

### 3 Modélisation du couplage

La façon dont le couplage est modélisé est un point important pour son analyse. Nous pouvons considérer donc deux notions : la notion de force et la notion électrique.

#### 3.1 Notion de force

Le couplage peut être modélisé du point de vue des forces, à partir des concepts présentés dans cette section. Nous pouvons définir le couplage comme l'opposition des forces entre deux objets ou entre un homme et un objet. Ces forces permettent l'union physique de ces entités durant une période de temps définie. Un concept fondamental pour le couplage doit également être pris en compte : le frottement. Le frottement est lié aux forces tangentielles évitant le glissement de l'objet. Le frottement sec ou frottement de glissement est défini comme le frottement qui apparaît lorsqu'un corps solide glisse sur un autre solide [Feynman et al., 1979].

Comme montré dans la Figure 2.3, la force nécessaire pour vaincre le frottement et pour tirer l'objet sur un autre dépend de la force normale  $N$  entre les deux surfaces en contact. Une approximation peut être faite, définissant la force de frottement  $F$  comme proportionnelle à la force normale perpendiculaire, avec un coefficient appelé coefficient de frottement  $\mu$  pouvant être constant :

$$F = \mu N \quad (2.1)$$

Ces forces de frottement sont donc mises en jeu lors du couplage en général, pour « empêcher le mouvement » soit entre deux objets soit entre l'humain et un objet.

Nous verrons dans le Chapitre 5 que ce frottement sec est présent lors de la conception de machines mécaniques et joue un rôle important dans la conception de dispositifs haptiques.

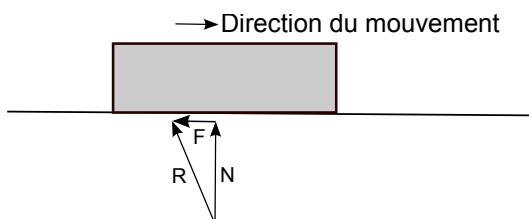


FIGURE 2.3 – Définition du couplage du point de vue des forces. Relation entre la force de frottement et la force normale pour un glissement [Feynman et al., 1979]

### 3.2 Notion électrique

La modélisation du couplage du point de vue électrique est basée sur les lois de Kirchhoff qui traite de la conservation de l'énergie et de la charge dans un circuit électrique. Les lois des Kirchhoff, c'est à dire la loi des nœuds et la loi des mailles, permettent de calculer la différence de potentiel aux bornes d'une résistance et l'intensité du courant dans le circuit. Selon la loi de nœuds, l'intensité des courants qui entrent dans un nœud est égale à l'intensité des courants sortants. La loi des mailles, quant à elle, considère que la somme des différences de potentiel autour de la maille est nulle.

Dans [Cadoz et al., 1984], les auteurs définissent la relation homme-objet, plus précisément instrumentiste-instrument, comme l'union de deux dipôles. Dans le cadre de la notion électrique, basé sur les lois de Kirchhoff décrites précédemment, le couplage peut être vu comme l'union de deux dipôles ayant le même voltage à leurs extrémités et ayant le même courant circulant de l'un vers l'autre. Ce type de représentation électrique est modulaire et permet de représenter de façon simple le couplage entre deux entités : soient des objets soient des représentations de l'homme. Elle sera utilisée par la suite pour la représentation des modèles à implanter sur le simulateur temps réel suivant le formalisme Cordis Anima (Annexe A).

## 4 Problématique du couplage dans le contexte de la simulation haptique

De façon générale, lorsque nous parlons de couplage, nous faisons référence à l'union de deux entités préalablement indépendantes qui deviennent dépendantes l'une de l'autre, notamment en termes de dynamique. Selon [Florens et al., 2006], si deux systèmes dynamiques indépendants sont soumis au couplage, un seul système dynamique constitué par les deux systèmes initiaux en résultera. L'idée classique du couplage action-perception décrite dans la Section 2.2 nous permet de proposer un raisonnement basé sur des systèmes.

En effet, la main de l'homme peut être considérée comme un système dynamique mécanique et physique. Suivant ses propriétés, elle s'intègre à son environnement, impliquant des relations avec d'autres systèmes du monde mécanique. Ces relations peuvent être représentées grâce au couplage. Le couplage entre différents systèmes mécaniques doit obéir à certaines lois physiques et aux propriétés du système résultant du couplage de différents systèmes, par exemple sa masse, sa raideur et sa viscosité.

Nous observons que les propriétés physiques du système couplé résultant sont corrélées aux caractéristiques des systèmes initiaux. Cette relation peut être dictée par des opérations simples telles que l'addition.

Nous allons désormais analyser les propriétés physiques du système couplé. Pour cela, il est important de prendre en compte l'environnement, réel ou virtuel, où se situent chacune des composantes du système.

Lorsque les objets couplés se situent dans l'environnement réel, nous observons une relation simple entre les propriétés physiques des systèmes initiaux et celles du système couplé résultant.

Par exemple, lorsque nous couplons deux objets de masses respectives  $m_1$  et  $m_2$ , la masse résultante,  $m$ , du nouvel objet est égal à la somme des masses des deux objets initiaux,  $m = m_1 + m_2$ . De la même façon il existe une relation opérationnelle entre les autres propriétés physiques des objets couplés avec celles de l'objet résultant [Florens et al., 2006]. Nous pouvons observer lors de l'association de deux ressorts avec des coefficients de raideur respectifs  $k_1$  et  $k_2$ , que la relation entre les raideurs de ces ressorts couplés et celle du ressort résultant,  $k$ , est donnée par l'addition des coefficients des deux ressorts couplés, c'est à dire  $k = k_1 + k_2$  quand  $k_1 \neq k_2$ . Dans le cas où  $k_1 = k_2$ , la raideur résultante

est égale à  $k = 2k_1 = 2k_2$  et peut être considérée comme une relation d'addition mais également de multiplication.

De façon générale, lors du couplage entre deux objets, nous pouvons définir des correspondances entre les propriétés quantitatives des objets. Par exemple, lors du couplage d'un objet A à un objet B en un seul objet C, les mesures d'une propriété quelconque de l'objet A et de l'objet B sont liées par une opération à la mesure de la propriété de l'objet C, par exemple une addition dans le cas de la masse. Ces correspondances sont valables dans le monde réel et concernent le couplage objet-objet et le couplage homme-objet. Cependant, la séparation des propriétés de la partie de l'homme couplé à l'objet du reste de l'homme n'est pas une tâche simple.

Ces relations issues des lois physiques entre les systèmes initiaux et le système couplé, définies dans le cadre d'un environnement réel, devraient rester valables dans l'environnement virtuel. Tel est le cas lors du couplage de deux objets se trouvant dans un environnement virtuel.

Cependant, la composition des objets ne se comporte pas de la même façon lorsque l'une des parties couplées se trouve dans le monde réel et l'autre dans le monde virtuel. Dans ce cas, l'objet couplé est issu d'une composition hybride entre un système physique réel et un système virtuel à travers une interface [Florens et al., 2006].

Les effets de ce type de couplage sont décrits dans [Florens et al., 2006], en considérant un système de simulation simple et en supposant les délais de calcul comme nuls. Les auteurs présentent une analyse fréquentielle des systèmes couplés basée sur l'hypothèse d'un système hybride temporaire, décrite dans la Section 4.6 du Chapitre 1. Ils analysent ainsi l'impact de la configuration du simulateur sur les propriétés structurelles de l'objet. Deux systèmes sont considérés : un composé d'une masse et d'un ressort et un composé d'une masse et de deux ressorts.

Dans le premier système, une masse réelle  $m$  est couplée soit avec un ressort réel  $k$  (Figure 2.4, système (a)) soit avec un ressort virtuel de raideur  $K$  (Figure 2.4, système (b)). Les lignes doubles verticales représentent la limite entre l'environnement réel et l'environnement virtuel. Nous utiliserons des minuscules pour représenter les paramètres dans l'environnement réel et des majuscules pour les paramètres dans l'environnement virtuel. Le paramètre virtuel  $K$  est alors réglé afin que le système masse ressort  $m - K$ , montre un comportement équivalent à celui du système  $m - k$ , par exemple, en termes de fréquence. Le ressort  $K$  représente alors un « équivalent virtuel » du ressort réel  $k$  et les systèmes (a) et (b) sont équivalents. La relation entre la raideur réelle et virtuelle est donnée par :

$$K = \frac{m}{T^2} \left( 2 - 2\cos T \sqrt{\frac{k}{m}} \right) \quad (2.2)$$

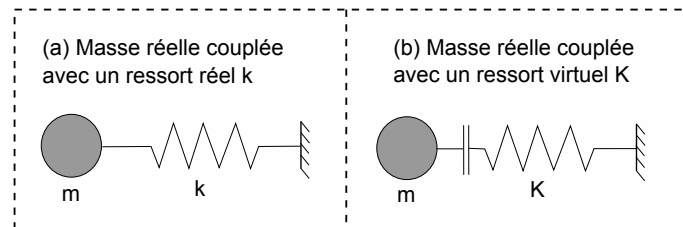


FIGURE 2.4 – Un système composé d'une masse réelle et d'un ressort réel et son équivalent avec un ressort virtuel. [Florens et al., 2006].

Dans le deuxième système, la masse  $m$  est couplée à deux ressorts réels, chacun de raideur  $k$  donc une raideur totale de  $k_2 = 2k$  (Figure 2.5, système (c)). Ce système est comparé à un système similaire conçu

avec deux ressorts virtuels de raideur  $K$  donc une raideur total de  $K_2 = 2K$  (Figure 2.5, système (d)). La relation établie par l'équation 2.2 entre  $k$  et  $K$  n'est plus valable pour  $2k$  et  $2K$  puisque l'équation n'est pas linéaire. Ces deux systèmes ont des comportements fréquentiels différents et restent proches seulement pour des valeurs faibles de  $k$ . Le système réel est également comparé à un système composé par la même masse réelle  $m$  et un assemblage hybride d'un ressort réel de raideur  $k$  et un ressort virtuel de raideur  $K$  (Figure 2.5, système (e)). Le comportement observé est encore différent de celui des deux cas précédents. Les différents couplages via une interface haptique montrent ainsi certaines inconsistances de paramètres. Les systèmes (c), (d) et (e) ne sont donc pas équivalents.

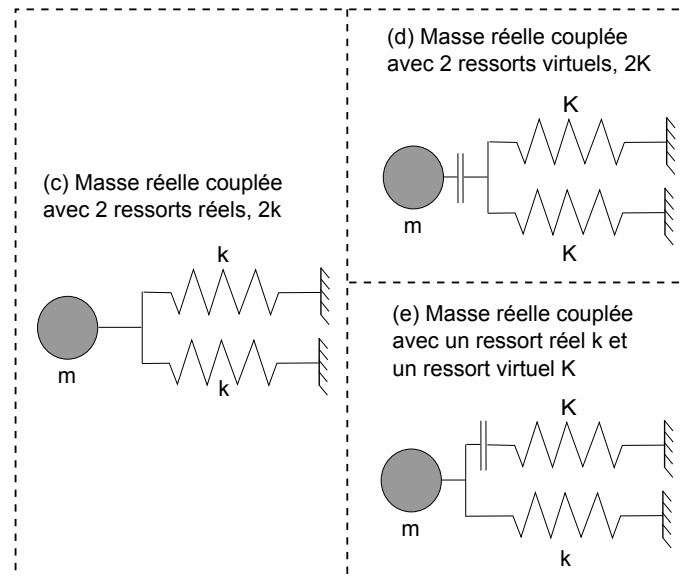


FIGURE 2.5 – Des systèmes composés d'une masse réelle et soit de deux ressorts réels, de deux ressorts virtuels ou d'un assemblage hybride d'un ressort réel et d'un ressort virtuel. Les systèmes (c), (d) et (e) ne sont pas équivalents [Florens et al., 2006].

Les différences de comportement entre ces systèmes sont dues aux effets de l'interface haptique et au traitement du signal effectué lors de la simulation, par exemple, sa bande passante limitée et sa représentation en temps discret. Dans le cas d'une simulation haptique, nous constatons toujours des problèmes liés à la dynamique, dûs à l'échantillonnage et aux délais de calcul. Ceux-ci causent l'invalidité des relations opérationnelles entre les propriétés valables dans le monde réel à celles issues du couplage homme-objet virtuel.

## 5 Analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique

Nous avons précédemment défini différentes catégories de couplage parmi lesquelles la situation médiatisée entre un homme et un objet virtuel. Nous avons présenté des critères de modélisation ainsi que la problématique du couplage dans le contexte de la simulation haptique. Nous allons maintenant définir les approches et la méthode qui seront utilisées par la suite pour l'analyse du couplage homme-système haptique.

## 5.1 L'interface haptique comme support du couplage homme-environnement virtuel

Il existe plusieurs interfaces permettant à l'homme d'interagir avec des objets virtuels. Ces interfaces sont connues comme des interfaces haptiques. La technologie des dispositifs haptiques est basée sur la téléopération permettant d'interagir avec des objets réels à distance. Nous allons décrire de façon générale, la téléopération et son lien avec les dispositifs haptiques.

### 5.1.1 La Téléopération

Le terme Téléopération fait référence à une opération à distance. Elle permet de contrôler et de manipuler un objet se trouvant à un endroit hors de portée. Dans la téléopération, il y a deux acteurs principaux, le maître, un robot avec plusieurs degrés de liberté opéré par l'homme et l'esclave, un manipulateur à distance contrôlé par le maître. Le modèle général de la téléopération est alors un système bilatéral à deux ports comme le montre la Figure 2.6.

Les premiers télémanipulateurs ont été construits dans le cadre de l'industrie nucléaire afin de protéger les opérateurs de la manipulation directe de matériaux radioactifs. Le premier télémanipulateur à couplage électrique a été conçu par Goertz [Goertz, 1952] [Goertz and Thompson, 1954]. Les télémanipulateurs ont toujours été d'une grande utilité pour la réalisation de tâches pouvant s'avérer dangereuses ou impossibles pour l'opérateur humain, par exemple pour des travaux en milieu radioactive, en milieu sous marin ou dans l'espace. Ils peuvent également s'avérer utiles dans les cas où les échelles métriques entre l'environnement de l'opérateur et l'environnement de travail sont différentes, par exemple en milieu microscopique ou à une échelle nanométrique.

Pour des opérations spatiales, la manipulation à distance présente plusieurs avantages par rapport à la manipulation directe. Le risque pour le personnel, les équipements nécessaires et la complexité de la logistique sont considérablement réduits et les ressources humaines sont plus efficacement utilisées. Ces avantages augmentent la sécurité et diminuent le coût des opérations [Lawrence, 1993]. Cependant, les systèmes de téléopération d'aujourd'hui ne sont pas encore capables de remplacer un homme dans la plupart des tâches de manipulation. L'expérience montre des performances décevantes des tâches réalisées par une téléopération comparées à celles par une manipulation directe. Le temps d'exécution d'une tâche par téléopération peut être plusieurs fois supérieur à celui d'une manipulation directe selon sa difficulté [Hannaford et al., 1991], [Lawrence, 1993]. En effet, lors de la téléopération, des délais de communication importants dus à la propagation du signal ainsi qu'au multiplexage, au codage et au décodage peuvent être observés.

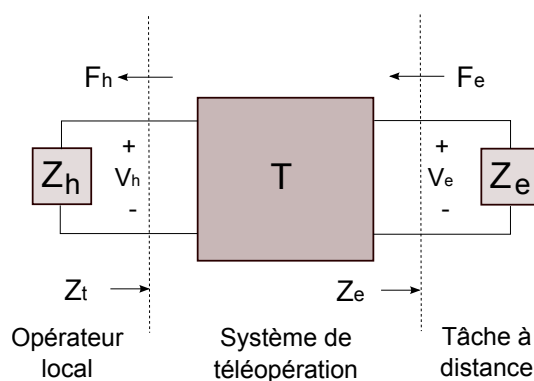


FIGURE 2.6 – Modèle général à deux ports d'un système bilatéral de téléopération [Lawrence, 1993]

Tout système de téléopération bilatéral doit fournir une transmission fidèle des signaux entre le maître et l'esclave afin de coupler l'opérateur le plus étroitement possible à la tâche à distance [Lawrence, 1993] de façon qu'il sente qu'il interagit directement avec la tâche à distance [Raju et al., 1989]. Le système de téléopération idéal doit être transparent c'est à dire, l'esclave doit exactement reproduire les déplacements du maître et le maître doit être capable de restituer à l'opérateur les efforts réalisés par l'esclave.

Selon la Figure 2.6, la condition de transparence est donnée par la relation entre l'impédance  $Z_t$  transmise à l'opérateur et l'impédance  $Z_e$  de la tâche [Lawrence, 1993] :

$$Z_t = Z_e \quad (2.3)$$

### 5.1.2 De la téléopération à l'haptique

Selon [Hayward et al., 2004], la téléopération peut être considérée comme la discipline mère de l'haptique. Celle-ci peut alors être considérée comme une téléopération où l'esclave à distance est virtuel, purement calculatoire. Des dispositifs haptiques ont été conçus afin de permettre à l'utilisateur de « toucher » des objets virtuels.

En général, la science de l'haptique traite des interactions du toucher ou des contacts physiques ayant comme but de percevoir, d'explorer ou de manipuler. Selon [Salisbury et al., 2004], ces interactions peuvent être possibles entre une main humaine et un objet réel, un bras manipulateur d'un robot et un objet réel, une main humaine et un objet simulé à travers un dispositif haptique ou une combinaison de l'homme, de machines et d'objets réels, virtuels ou à distance.

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs définitions des dispositifs et des interfaces haptiques :

- Selon [Colgate et al., 1995], un dispositif haptique ou une interface à retour d'effort, est un dispositif qui permet à l'utilisateur de toucher, sentir et manipuler des environnements virtuels.
- Selon [Hayward et al., 2004], les interfaces haptiques génèrent des signaux mécaniques et stimulent la kinesthésie de l'homme et les canaux du toucher. Elles fournissent à l'homme des moyens pour interagir avec son environnement et sont conçues pour associer le toucher et la kinesthésie dans les communications entre l'homme et les machines.
- Selon [Florens, 2008], le terme transducteur gestuel est également utilisé pour définir une interface multisensorielle. Il est défini comme une interface physique procurant à l'utilisateur la sensation de toucher, ou plus généralement lui permettant d'interagir physiquement avec un monde distant ou virtuel. C'est un instrument préhensible qui est capable de fournir un effort selon l'interaction qu'il subit dans le monde distant ou virtuel.
- [Ramstein, 1991] le définit comme un dispositif matériel qui réalise la correspondance entre l'espace sensori-moteur du geste et l'espace numérique de la simulation.

Le rendu haptique lié aux interfaces haptiques, permet à l'utilisateur de « sentir » les objets créés dans l'environnement virtuel [Salisbury et al., 2004].

Les dispositifs haptiques peuvent être classifiés en deux groupes selon le type de connexion [Marlière, 2006] :

- Admittance : un type de connexion d'un dispositif à retour d'effort où les forces sont envoyées vers le système de traitement ou l'espace virtuel et où les positions contrôlent en retour ce dispositif.
- Impédance : un type de connexion d'un dispositif à retour d'effort où les positions sont envoyées vers le système de traitement ou l'espace virtuel et où les forces contrôlent en retour ce dispositif.

Ces dernières années, de nombreux dispositifs haptiques ont été développés et certains d'entre eux sont même commercialisés. Leurs caractéristiques sont très diverses en termes de morphologies, de tailles, de domaines d'application et de technologies utilisées. Dans ce document, nous n'approfondirons pas l'état de l'art des interfaces haptiques. Il existe déjà un grand nombre de documents proposant la description d'un grand nombre d'interfaces ainsi que leur classification et leur performances [Couroussé, 2008] [Enactive Network, 2007] [Lawrence et al., 2000].

### 5.1.3 Performances des dispositifs haptiques

Selon [Florens, 2008], les performances d'un simulateur équipé d'une interface haptique sont données par les propriétés dynamiques de ses composants, c'est à dire, de l'interface haptique, du simulateur et du système de commande. Plusieurs autres critères de performance ont été pris en compte pour caractériser les interfaces haptiques, par exemple, le temps de réalisation de la tâche, sa viscosité, sa raideur virtuelle ainsi que sa perception par l'homme [Colgate and Brown, 1994] et sa transparence.

Les concepts de transparence et de stabilité appliqués en téléopération et en robotique peuvent être étendus dans le domaine des interfaces haptiques. La transparence dans le cadre des interfaces haptiques est définie par [Lawrence et al., 1996] comme la notion utilisée pour quantifier la fidélité avec laquelle les propriétés de l'objet virtuel sont présentées et perçues par l'opérateur humain. Elle constitue l'une des performances les plus étudiées des interfaces haptiques [Colgate and Brown, 1994].

Selon [Lawrence et al., 2000], les performances des interfaces haptiques sont évaluées à deux niveaux :

- Un bas niveau comprenant les mesures de performances du système réalisées à partir des caractéristiques techniques telles que la résolution des capteurs, les propriétés dynamiques des actionneurs, la bande passante de la force et la raideur.
- Un haut niveau comprenant les tests de performances globales du système, par exemple, le temps nécessaire pour réaliser une tâche et la mesure de la force appliquée.

A partir de cette classification, les auteurs considèrent que les performances de bas niveau sont faciles à quantifier en termes techniques mais la valeur perçue par l'utilisateur de l'interface haptique est difficile à établir. En ce qui concerne l'étude des performances de haut niveau, ils considèrent qu'elle fournit un critère de comparaison entre les systèmes existants, mais qu'il est difficile de corréliser ses résultats avec les capacités techniques des capteurs, des actionneurs et des contrôleurs.

Malgré ces inconvénients, ces évaluations permettent d'avoir une idée des performances générales du système ou par rapport à un critère défini. Elles restent une référence pour la conception et surtout pour l'évaluation des dispositifs haptiques actuels.

## 5.2 Approches pour l'analyse du couplage homme-environnement virtuel

### 5.2.1 Le rôle de l'enaction et de l'incorporation dans l'analyse du système couplé homme-objet

Lors de l'analyse du système couplé homme-objet, il est important de prendre en compte les concepts d'enaction et d'incorporation. En reprenant les définitions données dans le Chapitre 1, Sections 2.3 et 2.4, nous observons que les concepts d'enaction et d'incorporation sont étroitement liés au couplage homme-objet.

Du côté de l'enaction, la connaissance enactive est basée sur la manipulation d'objets [Pasquinelli, 2007]. Le principe de base de l'enaction est centré sur l'interaction de l'homme avec son environnement et plus précisément, sur le couplage dynamique sensorimoteur entre un organisme et son environnement [Stewart, 2007]. Le couplage entre l'homme et son environnement peut alors être considéré comme un cas



représentatif de la théorie de l'enaction. L'homme s'approprie un objet pour réaliser une action qui lui est nécessaire pour acquérir des connaissances. En dehors des cas comme ceux de la conduite d'une voiture ou d'un vélo, il existe des cas plus particuliers, notamment ceux de l'interaction avec des instruments de musique. Nous pouvons considérer que ce type de tâches ne peut être caractérisé qu'à partir de l'étude du système couplé main-objet, par exemple du système violoniste-archet-violon. Ce type d'actions donnent à l'homme la possibilité d'étendre son système de contrôle et de perception sur l'objet utilisé pour réaliser l'action.

Les représentations enactives sont acquises par la pratique. Cet apprentissage par la pratique constitue une dimension théorique importante pour les théories enactives mais provoque des conséquences pragmatiques pour les interfaces enactives. Les utilisateurs doivent explorer et se familiariser avec la dynamique sensorimotrice résultant d'une nouvelle interface avant de pouvoir la maîtriser [Pasquinelli, 2007].

D'un autre côté, l'incorporation définit la relation que la personne établit avec l'objet lorsqu'elle le saisit ou le manipule. Elle sent alors l'objet comme une extension d'elle-même ou une partie de son corps [Fels, 2000]. Comme dans le cas de l'enaction, l'incorporation implique une interaction avec l'environnement donc un couplage homme-objet.

Ces définitions sont importantes pour l'analyse du couplage homme-objet puisqu'elles définissent la relation entre l'homme et les objets saisis en situation naturelle ou artificielle. Lors du développement d'interfaces haptiques, il est important de concevoir des interfaces permettant à l'homme de manipuler l'objet virtuel de la même façon qu'un objet réel. Il est également important d'étendre son système de contrôle et de perception pour qu'il acquière des connaissances par la pratique et qu'il s'entraîne à la réalisation d'une tâche spécifique comme en Chirurgie. Pour y arriver, ces interfaces doivent permettre d'établir une relation d'incorporation entre l'homme, l'interface et l'objet virtuel, de la même façon qu'entre l'homme et l'objet réel comme entre un peintre et son pinceau ou un musicien et son instrument. Pour concevoir des interfaces haptiques enactives, il est donc nécessaire d'approfondir ses connaissances sur les propriétés du système couplé homme-objet virtuel.

### 5.2.2 Le système homme-système haptique vu comme un système hybride temporaire

Les concepts d'enaction et d'incorporation décrits précédemment donnent une base aux approches comme celle d'un système hybride temporaire (Chapitre 1, Section 4.6). Cette approche considère que, lors de l'interaction, nous pouvons observer un système physique, quasi-autonome constitué d'une partie limitée de la mécanique de l'homme et de l'objet ou d'une partie de celui-ci.

Le système à analyser n'est alors plus l'objet manipulé mais le THS choisi [Florens et al., 2006]. Cette approche est intéressante dans le cadre de l'haptique. A la différence de la robotique où la plupart des informations reçues par le robot sont des informations phénoménologiques comme des trajectoires, les signaux reçus par le dispositif haptique sont des informations sur les propriétés de l'objet. Celui-ci est réalisé par simulation et se trouve dans l'environnement virtuel. Ceci est contraignant pour le couplage puisqu'il doit toujours se faire via l'interface haptique, servant d'outil d'accès ou de porte d'entrée au domaine virtuel. De plus, ces objets virtuels sont attachés à une référence prédéfinie qui empêche de les manipuler librement comme ce serait le cas avec des objets réels, par exemple tourner une poignée indéfiniment. Le simulateur haptique est interactif, conçu pour être manipulé par l'homme. Il n'est donc pas possible d'effectuer une analyse des propriétés de l'objet s'il est séparé de l'homme. Il s'agit d'un système ouvert dans lequel nous avons besoin de manipuler l'interface pour obtenir des informations sur l'objet virtuel. L'observation des propriétés de l'objet est impossible sans cette interface et aucun dispositif n'est capable de caractériser directement les propriétés de l'objet virtuel.



Nous utilisons alors l'approche d'un THS qui nous permet d'étudier un système fermé temporaire, plus simple à analyser. Cette approche présente la difficulté de contenir la présence de l'homme dans sa boucle. Ce système temporaire peut être considéré comme un système fermé formé par l'objet virtuel, l'interface et une partie limitée de l'homme. Elle nous permet également de regrouper les deux niveaux fondamentaux du couplage homme-objet observés lors de la manipulation :

- Le couplage dans le monde réel entre l'homme et l'interface à travers laquelle il manipule l'objet simulé.
- Le couplage entre l'homme et l'objet simulé.

### 5.3 Méthode pour l'analyse du couplage en utilisant un simulateur haptique

Nous réalisons une étude du couplage homme-système haptique basée sur l'hypothèse d'un système hybride temporaire, considérant le système couplé comme un système dynamique ayant ses composantes inséparables.

Ce système va être modélisé, caractérisé et quantifié en mesurant ses paramètres dans certaines situations de couplage.

Pour cette analyse, nous définissons des tâches de référence à partir d'une typologie du geste.

Le système hybride temporaire est modélisé selon ces tâches et un dispositif est mis en place pour l'analyse du couplage. Ce dispositif adapte l'interface haptique pour la mesure du geste, c'est à dire l'acquisition des signaux de force et de position issus du simulateur. Cette adaptation comprend un étalonnage du simulateur afin de trouver la signification physique des mesures et leur acquisition.

Les modèles sont alors quantifiés à partir des signaux acquis en utilisant une méthode d'identification de paramètres. Ces mesures quantitatives doivent mettre en évidence le système couplé. L'objectif est de caractériser le couplage comme un système dynamique ayant des propriétés définies.

L'interface haptique peut ainsi être considérée à la fois comme un objet de l'étude que comme un outil pour l'analyse.

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi différentes catégories de couplage dont celle de notre étude entre l'homme et l'objet en situation médiatisée, c'est à dire l'interaction avec un objet virtuel via une interface.

Pour effectuer son analyse, nous avons choisi de considérer la relation homme-objet virtuel comme un système hybride temporaire ayant ses parties inséparables. L'interface haptique, maillon constitutif de ce THS, est alors considérée comme l'objet de l'étude mais également comme un outil d'analyse, puisqu'elle nous permettra d'acquérir les signaux lors du couplage.

Les choix de l'approche d'un THS ainsi que de la méthode d'analyse ont été faits afin de simplifier le système étudié. Cependant, la mise en œuvre du dispositif d'expérimentation implique un travail technique important. Même si nous disposons d'une interface performante, elle ne sera pas adaptée pour effectuer et acquérir directement les mesures.

Enfin, le chapitre suivant présentera une typologie du geste afin d'identifier des gestes de référence pour l'analyse du couplage.

## Chapitre 3

# Typologie du geste pour l'analyse du couplage

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>39</b>
<b>2</b>	<b>Le geste</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>La préhension dans la main humaine</b>	<b>41</b>
3.1	Classification des modes de préhension selon la forme de l'objet	42
3.2	Classification selon la forme de la main lors de la saisie	43
3.3	Classification des modes de préhension selon la surface de la main en contact avec l'objet	44
3.4	Classification selon la fonction de la main	44
3.5	Classification selon la force et la précision requises pour la saisie	45
3.6	Autres classifications générales des modes de préhension	47
<b>4</b>	<b>Le geste instrumental</b>	<b>47</b>
4.1	Classification des gestes selon leur nature intrinsèque	48
4.2	Classification des gestes selon leur fonction vis à vis de l'instrument	48
4.3	Classification des gestes selon des critères d'analyse	48
4.4	Classification des gestes selon sa finalité	49
<b>5</b>	<b>Typologie du geste dans le cadre du couplage homme-système haptique</b>	<b>49</b>
5.1	Classification des gestes selon le contact avec l'environnement	50
5.2	Classification des gestes selon la préhension	50
5.3	Classification des gestes selon l'énergie	51
5.4	Classification des gestes selon la fréquence d'exécution	51
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>51</b>

---

## 1 Introduction

Afin de connaître, de transformer ou de communiquer avec son environnement, l'homme réalise différents gestes, avec son corps et principalement avec ses mains. Ces gestes manuels constituent le moyen le

plus important pour l'homme d'interagir avec son environnement. En effet, l'exécution d'un geste peut lui permettre de toucher un objet pour connaître certaines de ses caractéristiques comme sa texture qu'il lui serait impossible de connaître parfaitement avec les autres sens. Hormis la connaissance des caractéristiques spécifiques de l'environnement, c'est à dire de recevoir des informations sur l'environnement, le geste peut également lui permettre de le modifier et de communiquer avec, c'est à dire d'envoyer des informations. L'homme peut modifier son environnement en le déplaçant, en le modifiant et en créant des outils. L'envoi d'informations est propre au geste puisque les autres canaux sensoriels comme la vue ou l'ouïe ne permettent que de recevoir des informations. Cette propriété du geste permettant à la fois la connaissance et la transformation de l'environnement, a intéressé de nombreux chercheurs.

Les gestes ont été étudiés dans différentes disciplines, allant des domaines médicaux comme la psychologie et la physiologie jusqu'aux domaines scientifiques tels que la robotique et l'imagerie. Le principal objectif de ces études sur le geste est de comprendre l'interaction entre l'homme et son environnement et de comprendre comment il choisit et exécute ses mouvements pour saisir un objet. Dans ce chapitre, nous allons traiter en premier lieu du mouvement de l'homme vers une cible. Nous étudierons ensuite la préhension humaine qui s'intéresse à la manière dont l'homme saisit des objets et aux facteurs qui le conditionnent à effectuer la saisie d'une manière plutôt qu'une autre. Selon certains chercheurs, ces choix sont liés aux caractères de la tâche que nous voulons réaliser avec l'objet. D'autres affirment qu'ils dépendent des caractéristiques physiques de l'objet telles que sa taille et sa forme. Les motivations varient également selon le domaine. En psychologie, les chercheurs veulent comprendre pourquoi l'homme utilise un geste plutôt qu'un autre pour interagir avec un objet. Les chercheurs en médecine, quant à eux, désirent réaliser des interventions chirurgicales sans compromettre leur fonctions de manipulations et de saisie et concevoir des prothèses adaptées à la réalisation de tâches d'interaction. En ce qui concerne la robotique, les motivations restent les mêmes que dans la plupart des études effectuées sur l'homme par des roboticiens. Il faut connaître le comportement humain afin de réussir la conception de machines manufacturées pouvant effectuer les mêmes tâches qu'un opérateur humain ou de réaliser des robots humanoïdes. Après cette classification des modes de préhension humaine, nous nous intéresserons au geste instrumental, défini dans le cadre de l'informatique musicale et de l'utilisation d'un ordinateur comme outil de création.

Nous présenterons alors une analyse des gestes et des différentes catégories de gestes proposés dans la littérature, ainsi que de leur fonctions dans la perception et dans l'exécution de tâches, c'est à dire, lors de l'interaction avec l'environnement. Pour réaliser cette analyse, nous préciserons quelle partie du corps est impliqué dans le geste. En accord avec notre sujet de recherche, nous nous focaliserons sur les gestes des membres supérieurs et des mains impliquant un contact physique avec l'environnement.

Ce chapitre se divise ainsi en deux parties : la première partie reprend les éléments de la littérature centrés particulièrement sur la préhension humaine et les différentes typologies du geste instrumental. La deuxième partie propose une typologie du geste adaptée à l'étude de notre couplage homme-objet.

## 2 Le geste

Dans [Cadoz, 1988], Cadoz définit le geste comme l'ensemble des comportements complémentaires de l'émission vocale, par lesquels l'homme informe ou transforme son environnement. Cette définition du geste correspond à une approche informative. Dans cette section, nous nous concentrerons sur les gestes impliquant un contact physique avec l'environnements, c'est à dire liés à la saisie, à la manipulation et à la transformation d'objets. Nous ne traiterons pas ceux utilisés dans le langage des signes qui sont tout aussi importants mais qui ne rentrent pas dans le cadre de nos recherches.

Les gestes d'interaction impliquent généralement un mouvement de la main et du bras pour atteindre une cible. Dans la plupart des cas, un déplacement de la main vers un point spécifique est réalisé afin d'interagir avec un objet. De nombreux travaux ont été réalisés pour comprendre la façon dont la main se déplace d'un point à un autre pour l'exécution des tâches quotidiennes telles que la saisie et le déplacement d'un objet. Ce déplacement de la main vers une cible nécessite la coopération de plusieurs articulations. Il est en effet nécessaire de solliciter plusieurs muscles et au moins trois articulations, l'épaule, le coude et le poignet, ainsi que d'adopter une posture convenable [Bonnet et al., 1994]. Si ce mouvement est réalisé à des fins préhensiles, par exemple pour la saisie d'un objet que l'homme cherchait à atteindre, il aura une vitesse variable. La vitesse tangentielle de la main augmentera rapidement jusqu'à atteindre un maximum pour ensuite diminuer progressivement et s'arrêter lors du contact avec la cible. En effet, quand la main sera proche de la cible, la phase de décélération débutera et le mouvement se terminera par une collision avec l'environnement. La courbe de la vitesse en fonction du temps aura alors l'allure d'un cloche légèrement asymétrique.

Lors du déplacement de la main vers la cible, une phase d'ouverture des doigts est suivie par une phase de fermeture des doigts pour saisir l'objet lorsqu'il est atteint. Selon des études cinématiques [Jeannerod, 1984], la position des doigts lors de la saisie dépend de la forme et de la taille de l'objet. La taille de l'objet influence également la taille de l'ouverture de la main mais pas sa vitesse.

Les principes utilisés pour planifier et pour exécuter les mouvements d'une main constituent un problème fondamental pour la recherche en neurosciences. Pour atteindre une cible avec la main, l'homme réalise des mouvements stéréotypés suivant une trajectoire lisse [Dingwell et al., 2003]. En présence de perturbations, l'homme s'adapte pour préserver cette trajectoire stéréotypée.

### 3 La préhension dans la main humaine

Après l'analyse des mouvements de la main pour atteindre une cible, il est important d'étudier la façon dont cette cible peut être saisie par la main.

La main est l'organe spécialisé de la préhension chez l'homme. Kapandji [Kapandji, 1989] la définit comme un outil multi-prise et multi-fonction permettant à l'homme de réaliser des fonctions essentielles comme se nourrir ainsi que de créer des outils et de les utiliser comme des prolongements de la main. Lors de l'utilisation de ces outils créés par l'homme pour l'exécution d'une tâche et en général lors de la manipulation d'objets soit pour les transformer, les manipuler ou les transporter, l'homme réalise des mouvements ou des gestes de préhension. La main et sa fonction préhensile sont indispensables pour la réalisation d'activités socio-culturelles réalisées à l'aide d'un outil ou d'un instrument qu'il faut saisir et utiliser comme dans le cas de l'écriture, du dessin, de la peinture et de la musique. La main réalise également des gestes non préhensiles remplissant une fonction très importante pour la communication avec l'environnement. Le langage des signes dans le cas des personnes avec des problèmes d'audition ou certains gestes complétant la communication verbale et l'expression de sentiments en sont les parfaits exemples [Kapandji, 1989].

La préhension est généralement considérée comme la faculté de saisir des objets. Selon [MacKenzie and Iberall, 1994], la préhension implique de tenir un objet avant de le manipuler, de le transporter ou de le sentir. Kapandji [Kapandji, 1989] la définit comme la faculté de figer puis de bouger volontairement un objet par rapport au corps et à l'environnement. Cette faculté permet à l'homme d'établir un couplage mécanique étroit avec l'objet. Il est possible grâce aux pouces opposables, c'est à dire grâce à la faculté de porter ses pouces vers les autres doigts pour former des pinces.

Il est important de rappeler que le frottement est fondamental pour la saisie. Les forces de frottement

apparaissent lorsque l'homme serre l'objet et sans ces forces de frottement exercées entre la main et l'objet, la saisie serait impossible.

### 3.1 Classification des modes de préhension selon la forme de l'objet

Selon les besoins et les avancées technologiques, les hommes se sont intéressés à l'étude de la main humaine et notamment à ses fonctions préhensiles de différents points de vue. La préhension humaine a intéressé des domaines variés de l'anatomie et la réhabilitation jusqu'à la manufacture et la robotique [Slocum and Pratt, 1946] [Napier, 1956] [Lyons, 1985] [Liu et al., 1989]. Ces études de la préhension humaine, quelque soit leur domaine ou leur finalité, ont conduit à divers classements des gestes de préhension.

Une des premières classifications de la préhension datant du début du vingtième siècle a été établie par [Schlesinger, 1919]. Elle est basée principalement sur la forme de l'objet mais aussi sur les surfaces de la main en contact avec l'objet lors de la saisie. Il a défini six types basiques de préhension telles que la préhension cylindrique, digito-pulpaire (avec les bouts des doigts), en crochet, palmaire, sphérique et latérale comme le montre la Figure 3.1. Bien qu'il n'ait pas spécifiquement donné de noms aux saisies, elles ont été nommées et résumées par Taylor dans [Taylor and Schwarz, 1955]. En effet, nous pouvons observer que cette classification tient compte de la forme de l'objet, par exemple pour les saisies cylindrique et sphérique, de la forme de la main lors de la saisie, dans le cas de la saisie en crochet, ainsi que des surfaces de la main en contact avec l'objet, pour les saisies digito-pulpaire, palmaire et latérale. Cette première classification est la base des classifications futures utilisées dans le cadre de la chirurgie et la réhabilitation de la main ainsi que pour le développement des effecteurs et de mains robotiques.

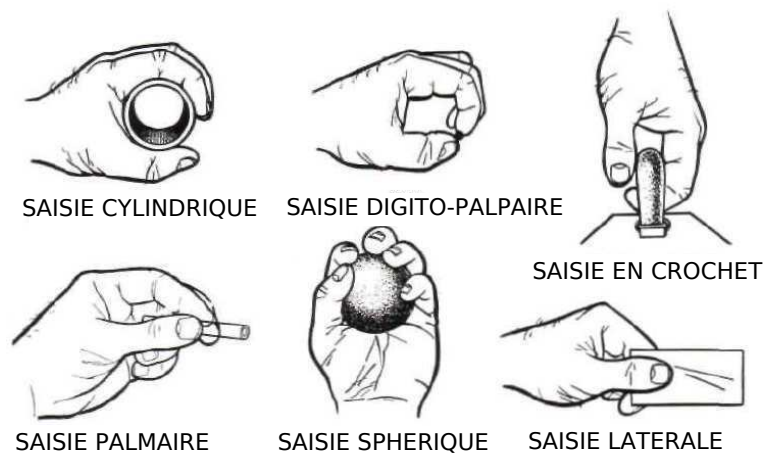


FIGURE 3.1 – Modèles de préhension proposés par Schlesinger en 1919, d'après [Taylor and Schwarz, 1955]

Plus récemment, dans le cadre du développement d'un planificateur de saisie pour des robots manipulateurs, Bekey et al. [Bekey et al., 1993] décrivent six modes de préhension génériques, pris comme modèle pour le développement de leurs mains robotiques. Ils considèrent que la capacité de la main humaine pour saisir des objets de différentes tailles et de différentes formes permet de lier la géométrie de l'objet et l'information sur la tâche avec un mode de préhension déterminé. Selon cette considération, le planificateur de saisie est basé sur la connaissance du comportement et des gestes de la préhension humaine. Il permet au robot de choisir le geste le plus adapté selon la géométrie de l'objet et la tâche à effectuer afin de réaliser une saisie comme celle de l'homme. Il sera alors capable de choisir les doigts à utiliser, la taille de l'ouverture de la main ainsi que d'autres caractéristiques pour chacune des tâches.

Le robot connaîtra certains modes de préhension humaine. L'information sur l'objet sera acquise grâce à un système de vision et la tâche sera communiquée par des phrases d'instructions interprétables par le système. Le choix des modes de préhension est basé sur la reconnaissance d'image, appelé « Reconnaissance par composantes » (RBC), proposé par Biederman [Biederman, 1987]. Cette reconnaissance considère que la reconnaissance des objets par l'homme est effectuée par segmentation des objets en blocs, en cylindres, en cales et en cônes. Bekey et al. [Bekey et al., 1993] considèrent ainsi six primitives géométriques telles que le cône, le cylindre, la boîte, le tore et la sphère pour définir six types de préhension humaine tels que la saisie de force, la pince de précision, la saisie en crochet, la saisie pulpaire, la saisie sphérique et la saisie latérale, comme le montre la Figure 3.1.

- La saisie de force : elle correspond à la saisie cylindrique de [Taylor and Schwarz, 1955]. Les doigts sont fléchis complètement et le pouce opposé est fléchi sur les doigts pour incrémenter la puissance comme lors de l'utilisation d'un marteau.
- La pince avec les pointes de doigts ou de précision : elle correspond à la saisie digito-pulpaire. Les pointes des ongles de l'index et du pouce se rapprochent. Une tâche représentative de ce type de préhension est la prise d'une épingle d'une surface plate.
- La saisie en crochet : les doigts sont fléchis aux niveaux des articulations interphalangiennes et étendus aux niveaux des articulations métacarpophalangiennes. Une tâche représentative de ce type de préhension est la portée d'une valise.
- La saisie pulpaire : Les bouts de l'index et du pouce sont opposés avec les articulations interphalangiennes étendues. Une tâche représentative de ce type de préhension est la saisie d'une feuille en papier.
- La saisie sphérique : Tous les doigts sont légèrement fléchis en forme d'arcs, comme lors de la saisie d'une balle.
- La pince latérale : Le bout du pouce est opposé au coté radial de la phalange intermédiaire de l'index comme lorsqu'on tourne une clé.

Ces modèles de préhension sont basés sur les huit modèles de préhension définis précédemment par Liu et al. [Liu et al., 1989]. Liu considère deux saisies supplémentaires :

- La pince multiple : Les pulpes des doigts de l'index et des doigts du milieu sont mis en contact avec la pulpe du pouce comme lors de la manipulation d'un stylo pour l'écriture.
- La pince étendue : A partir de la saisie en crochet, les articulations interphalangiennes sont étendues d'approximativement 30 degrés comme lors de la saisie d'une bouteille.

Ces types de préhension sont liés à ceux définis initialement par [Schlesinger, 1919], mais Bekey et al. [Bekey et al., 1993] font également référence au type de la tâche, comme dans le cas de la saisie de force, qui fait référence à la force nécessaire pour l'exécution de la tâche.

Enfin, ce type de classifications a été proposé pour répondre au mieux aux tâches courantes. Nous pouvons observer que le choix du type de préhension dépend plus de l'action à réaliser avec l'objet que des caractéristiques physiques de celui-ci tels que sa taille ou sa forme [Cutkosky, 1989]. Par exemple, nous ne saisissons pas de la même manière un stylo pour le ramasser et lorsque nous voulons l'utiliser pour écrire.

La surface de la main en contact avec l'objet lors de la saisie est étroitement liée à la forme de celui-ci et donc au critère de classification défini dans la Section 3.1.

### 3.2 Classification selon la forme de la main lors de la saisie

Griffiths [Griffiths, 1943] a proposé une classification orientée selon la forme de la main lors de la saisie définissant ainsi cinq formes de saisie : la saisie cylindrique, la saisie sphérique, la saisie annulaire, la saisie en forme de pince et la saisie en forme de tenaille [Iberall, 1987].

La forme adoptée par la main lors de la saisie est liée à la forme de l'objet. En effet, nous observons certains modes de préhension similaires entre la classification selon la forme de l'objet, proposée dans la Section 3.1, et la classification selon la forme de la main, par exemple, la saisie cylindrique et la saisie sphérique.

### 3.3 Classification des modes de préhension selon la surface de la main en contact avec l'objet

La surface de la main en contact avec l'objet lors de la saisie est également liée à la forme de celui-ci et donc au critère de classification défini dans la Section 3.1.

Le critère de classification selon la surface de la main en contact avec l'objet a été pris en compte par Schlesinger pour trois des six modes définis dans sa classification : les préhensions palmaire, pulpaire et latérale. Cette classification, proposée par Schlesinger, a été reprise par Keller et al. [Keller et al., 1947] et Taylor et al. [Taylor and Schwarz, 1955] lors des études sur l'anatomie et la mécanique de la main humaine pour la conception de prothèses. Dans [Keller et al., 1947], les auteurs ont choisi comme seul critère de classification, le contact entre la main et l'objet, gardant seulement trois des six catégories définies précédemment par Schlesinger. Ils ont étudié la fréquence de ces trois modèles de préhension, définissant deux actions de saisie de finalités différentes : la première action consiste à saisir l'objet seulement pour le ramasser et la deuxième à tenir l'objet afin de l'utiliser pour réaliser une tâche. Ils ont observé que le type de préhension utilisé pour saisir un même objet, dépend de l'action à réaliser avec celui-ci. Lors de ces expériences, ils ont également observé une prédominance de la préhension palmaire dans les deux activités, voir Table 3.1.

ACTION	OCCURRENCE DU TYPE DE PRÉHENSION		
	PALMAIRE (%)	PULPAIRE (%)	LATÉRALE (%)
Ramasser l'objet	50	17	33
Tenir l'objet pour une utilisation	88	2	10

TABEAU 3.1 – Fréquences des modes de préhension, selon [Taylor and Schwarz, 1955] [Keller et al., 1947]

McBride [McBride, 1942] a également présenté une classification basée sur les parties de la main utilisées lors de la saisie. Il a ainsi défini trois catégories : la saisie avec toute la main, la saisie avec les doigts et le pouce et la saisie digito-palmaire [Iberall, 1987].

### 3.4 Classification selon la fonction de la main

En 1944, Slocum et Pratt [Slocum and Pratt, 1944] [Slocum and Pratt, 1946] ont étudié les fonctions préhensiles de la main afin de définir les principes fondamentaux de sa réhabilitation fonctionnelle. Ils ont défini trois « fonctions fondamentales de la main » : la saisie, la pince et le crochet. La première est considérée comme la fonction la plus importante. Selon l'auteur, ces fonctions sont considérées fondamentales parce qu'elles contiennent tous les éléments de puissance, de mouvement et de dextérité utilisés dans le moindre des mouvements de la main.

Ils définissent la saisie comme l'action combinée des doigts contre le pouce opposé et la paume de la main.



La pince consiste en l'apposition du bout du pouce contre la pulpe des doigts opposés. Nous pouvons citer comme exemple le ramassage d'un petit objet. Il définit également une pince multiple ramenant plusieurs doigts contre le bout du pouce par exemple pour tenir une feuille ou un stylo.

Le crochet consiste à fléchir les doigts de façon que les pulpes reposent parallèlement à la paume et légèrement séparées de celle-ci. Un exemple de ce type de préhension est la portée d'une valise.

Enfin, selon Slocum et Pratt, l'index a une importance fonctionnelle supérieure à celle de tous les autres doigts à cause de sa force, de sa position, de son action stabilisante lors de la saisie et de son action de pivot lors de la pince. La longueur des doigts est d'une importance évidente dans le déploiement de la main pour une saisie large comme pour prendre un ballon de football [Slocum and Pratt, 1946].

### 3.5 Classification selon la force et la précision requises pour la saisie

En 1956, Napier [Napier, 1956] a classifié les mouvements de la main comme des mouvements de préhension et de non préhension. Il définit les mouvements de préhension comme ceux dans lesquels l'objet est partiellement ou complètement saisi. Les mouvements de non-préhension sont définis comme ceux dans lesquels il n'y a pas de préhension mais dans lesquels il peut y avoir un contact. En effet, un objet peut être déplacé en le poussant soit avec la main soit avec l'un des doigts. Pour la classification des mouvements préhensibles de la main, l'auteur considère qu'il ne suffit pas de prendre en compte la géométrie de l'objet pour définir les modes de préhension mais qu'il faudrait également considérer d'autres aspects fonctionnels et anatomiques. Les aspects fonctionnels pris en compte pour cette analyse concernent, la forme et la taille de l'objet et l'influence de l'activité envisagée alors que pour les aspects anatomiques, la posture des doigts, du pouce, de la main et de l'avant bras. Il classifie alors les mouvements préhensibles de la main, selon une analyse du point de vue fonctionnelle et anatomique, en deux groupes basiques appelés la saisie de précision et la saisie de force. La saisie de force est définie comme celle où l'objet est tenu par une pince formée de doigts partiellement fléchis et de la paume de la main. La pression est ainsi exercée par le pouce qui repose dans le plan de la paume. La saisie de précision est celle dans laquelle l'objet est pincé entre les bouts des doigts et le pouce opposé. Ces deux catégories peuvent être observées dans la Figure 3.2. Selon l'auteur, ces deux catégories fourniraient, séparément ou en combinaison, la base anatomique pour toutes les activités préhensibles de la main humaine.

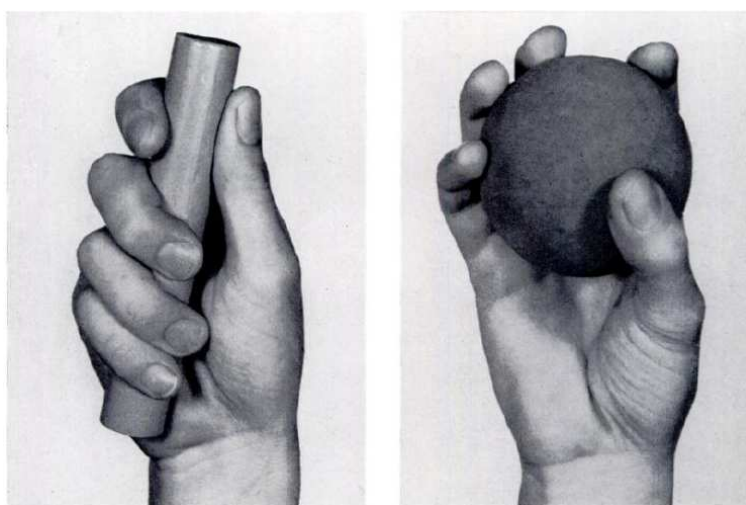


FIGURE 3.2 – Modes de saisie proposés par [Napier, 1956]. Saisie de force et saisie de précision

Lors des recherches sur l'assemblage robotique, Lyons [Lyons, 1985] présente un ensemble de saisies dérivé des études du comportement de la main humaine et de l'inspection des tâches d'assemblage.



Il classifie les configurations de la main en utilisant le concept de saisie. La saisie relie les positions et les mouvements des doigts à une tâche particulière. Elle est choisie à partir d'une liste finie de saisies possibles basée sur les caractéristiques de l'objet, par exemple sa taille et sa forme, et sur la tâche à réaliser avec cet objet, par exemple, le manipuler, le transporter, etc. A chacune de ces saisies est associée une configuration des doigts prédéfinie ainsi que les degrés de liberté de la main une fois l'objet saisi. En effet, le nombre de degrés de liberté est limité selon la saisie réalisée puisque certaines parties de la main doivent rester immobiles.

L'auteur se base également sur les critères fonctionnels classiques, et principalement sur les critères de force et de précision lors de la saisie comme dans la classification effectuée par Napier [Napier, 1956], pour classer les types de saisie. Lyons considère en premier lieu la force ou la fermeté de la saisie, en tenant compte que lors de la préhension d'un outil pour réaliser une tâche, la main doit saisir l'objet fermement. Il considère également, le niveau de précision requis pour la saisie, en tenant compte que pour certaines tâches la main doit être capable de réaliser des mouvements de précision fine. Tourner un écrou ou insérer une pièce dans un trou l'illustrent parfaitement. Cependant, ces critères restent très généraux et pour certaines tâches ni la fermeté ni la précision sont importantes, comme pour déplacer un objet d'un endroit à un autre.

Il définit ainsi trois types de saisies : la saisie englobante, la saisie latérale et la saisie de précision, considérant que ces configurations permettent à la main de fournir les fonctions nécessaires (Figure 3.3).

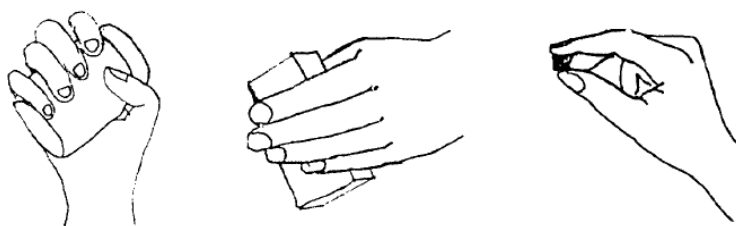


FIGURE 3.3 – Modes de saisie proposés par [Lyons, 1985] : la saisie englobante, la saisie latérale et la saisie de précision

La saisie englobante correspond à la saisie de force définie par [Napier, 1956]. Lors de cette saisie, la main enveloppe complètement l'objet fournissant une liaison ferme avec celui-ci. Elle ne facilite pas la manipulation fine. En effet, la manipulation peut seulement être réalisée en utilisant les degrés de liberté du bras et du poignet. Elle est utilisée pour les saisies requérant une force ou une fermeté importante mais également pour la saisie de petits objets ne requérant ni la fermeté ni la précision.

La saisie latérale correspond à la saisie en forme de pince, définie précédemment par [Slocum and Pratt, 1944]. Pour cette saisie, les doigts et le pouce se rapprochent formant une pince et les surfaces plates des doigts sont utilisées pour tenir l'objet. Elle permet une saisie ferme des objets plats et une saisie de précision des objets longs.

La saisie de précision permet un maximum de manipulations possibles, puisque l'objet saisi est tenu entre les bouts des doigts. Cependant, elle ne permet pas de saisir l'objet très fermement.

Cette classification proposée par Lyons, bien qu'utile dans le cadre de la conception de mains robotiques n'a pas constitué une nouveauté mais plutôt une redéfinition de la classification établie précédemment par Napier [Napier, 1956], selon la force et la précision requises lors de la saisie.

### 3.6 Autres classifications générales des modes de préhension

Dans [Cutkosky, 1989], Cutkosky a réalisé des études sur les gestes de préhension dans le cadre de la manufacture, afin de synthétiser ces gestes et de les recréer avec des mains robotiques capables de réaliser les mêmes tâches que celles réalisées par l'homme. Les saisies utilisées par les opérateurs lors des tâches de manufacture ont été répertoriées et une taxonomie de la saisie a été construite. Dans celle-ci, les auteurs décrivent des modèles de saisie des opérateurs lors des tâches de manufacture basées sur les classifications de Schlesinger [Schlesinger, 1919] et Napier [Napier, 1956]. Ils y ajoutent des types de saisie modifiés comme la saisie en crochet modifiée basée sur la saisie en crochet classique mais dans laquelle le pouce est posé sur l'outil pour avoir plus de contrôle. Les types de saisie sont classifiés selon la force ou la précision, en développant un arbre hiérarchique de types de saisies en fonction de la géométrie de l'objet et du nombre de doigts utilisés. En effet, la classification verticale, de haut en bas, part des tâches grossières aux tâches détaillées et la classification verticale, de gauche à droite, commence par des saisies de forces d'objets de grandes tailles vers une meilleure dextérité et une diminution de la taille de l'objet. Cette taxonomie permet d'identifier des types particuliers de saisie et d'identifier leur relation avec les types génériques de saisie. Elles sont utiles pour la classification des saisies en manufacture mais présentent des limitations aux tâches quotidiennes, par exemple, l'écriture n'est pas incluse. L'auteur indique que selon cette taxonomie, les saisies de précision semblent être motivées par la géométrie de l'objet. Cependant, le choix du type de saisie de préhension est lié à la tâche à réaliser.

## 4 Le geste instrumental

Dans le cadre de l'informatique musicale et des nouvelles technologies, les chercheurs ont introduit le concept de geste instrumental. En musique, il s'agit du geste réalisé par l'instrumentiste lors de son interaction avec un instrument de musique. Le geste participe alors à l'élaboration de sons en impliquant un contact direct avec l'instrument [Ramstein, 1991]. En informatique musicale, l'ordinateur est utilisé comme un outil pour la composition musicale, permettant la synthèse de sons. La synthèse est considérée par Cadoz [Cadoz, 1988] comme une mutation du processus de production de sons. En effet, l'instrument de musique est constitué d'objets réels qui vibrent grâce à l'action du geste. Cependant, lors de sa synthèse par ordinateur, les phénomènes impliqués ne sont pas physiques mais électroniques et numériques. Même si l'ordinateur permet la synthèse de sons, il ne peut pas être considéré comme un instrument [Cadoz, 1988]. De plus, l'utilisation d'un ordinateur dans la création a introduit la nécessité de restituer les mêmes conditions que l'expérience instrumentale. L'ordinateur doit alors remplir le même rôle que l'instrument d'un point de vue sensoriel. Ceci a conduit au développement de dispositifs faisant le lien entre le geste et l'ordinateur agissant comme des instruments virtuels. À l'ACROE, des dispositifs appelés « Transducteurs Gestuels Rétroactifs ou (TGR) », ont été conçus. Cadoz [Cadoz, 1994] a alors introduit le concept de canal gestuel dans la problématique de la communication homme-machine. Ce canal gestuel est défini comme un moyen d'action sur le monde physique et comme un moyen de communication informationnelle. D'un point de vue informationnel, il regroupe toutes les fonctions de communication. Il possède un caractère bidirectionnel puisqu'il sert comme moyen d'émission et de réception d'information, ce qui le différencie des autres canaux, par exemple visuel et auditif. En effet, les canaux visuel et auditif sont unidirectionnels et permettent seulement de recevoir de l'information mais en aucun cas de l'émettre. Ceci permet de réaliser des transducteurs universels comme un écran et un haut parleur. Le transducteur gestuel ou TGR, quant à lui, ne peut pas être universel. En effet, même si le canal gestuel peut remplir la même fonction que les canaux visuel et auditif avec un écran et un haut parleur, il est impossible de maintenir l'universalité avec la bidirectionnalité, vu la variété des gestes et

des instruments.

En informatique musicale avec l'utilisation d'ordinateurs comme outils de création, plusieurs classifications du geste instrumental ont été proposées dans la littérature selon différents critères : sa nature ou sa fonctionnalité.

#### 4.1 Classification des gestes selon leur nature intrinsèque

Dans le cadre de la synthèse de sons musicaux [Gibet, 1987], Gibet propose deux catégories pour la classification des gestes instrumentaux. La première est basée sur la nature du geste et les aspects ergonomiques, sans tenir compte de l'objet sur lequel le geste est exercé. La deuxième est liée à la fonction du geste vis-à-vis de l'instrument sur lequel il s'applique.

Cette première classification tient compte de la nature du geste et donc de sa fonction préhensile ou non, comme lors de la classification établie par Napier [Napier, 1956]. Dans ce cadre, l'auteur définit les fonctions préhensile et percussive du geste manuel.

Les gestes percussifs correspondent à des gestes non préhensibles impliquant un contact physique avec l'objet. Ils consistent à percuter, à taper ou à pousser un objet ou une surface. Les gestes préhensibles, comme ils ont été décrit précédemment, permettent de saisir ou de manipuler un objet. Leur temps de contact avec l'objet est en général supérieur à celui des gestes percussifs.

#### 4.2 Classification des gestes selon leur fonction vis à vis de l'instrument

Lors de cette deuxième classification, Gibet [Gibet, 1987] ne prend en compte que l'aspect opératoire des gestes et leur effet sur l'instrument. Selon les processus énergétiques se produisant lors de l'exécution du geste, deux catégories sont alors définies : les gestes d'excitation et les gestes de modification. Les gestes d'excitation sont définis comme ceux ayant une communication d'énergie mécanique avec le système excitateur ou vibreur. Nous pouvons citer comme exemple le frottement d'un archet sur la corde ou la percussion de la main sur un tambour. Les gestes de modification, quant à eux, modifient dynamiquement la structure de l'instrument, en modulant les paramètres mécaniques ou en changeant la forme de l'instrument. La modulation de la tension ou de la longueur d'une corde constitue un exemple de ce type de geste.

Une catégorie supplémentaire, appelée geste de sélection ou de désignation, concernant les gestes qui n'ont pas de qualité énergétique propre, a été définie. Ce type de geste est utilisé, par exemple, pour choisir une corde ou une touche lorsque l'homme joue un instrument. L'auteur considère que ce geste de sélection ne peut pas être acquis par le transducteur gestuel dans le contexte de la simulation instrumentale et correspond à des opérations mentales de désignation.

#### 4.3 Classification des gestes selon des critères d'analyse

Dans [Ramstein, 1991], Ramstein réalise une classification selon une analyse descriptive, une analyse fonctionnelle ou une analyse intrinsèque.

Lors de l'analyse descriptive, il considère que les gestes peuvent être classifiés selon les critères cinématique, spatial et fréquentiel. Le critère de classification cinématique est la vitesse d'exécution. Le critère spatial prend en compte la variété dimensionnelle des espaces dans lesquels les mouvements peuvent s'exécuter. Le critère fréquentiel est basé sur des techniques pour décomposer les mouvements selon

le contenu fréquentiel comme décrit dans [Berthoz, 1978]. Il considère que la plupart des mouvements humains se concentrent dans une bande fréquentielle entre 0 et 10 Hz.

Lors de l'analyse fonctionnelle, Ramstein [Ramstein, 1991] présente un classement du geste instrumental basé sur deux critères : le critère effecteur et le critère de saisie. Selon le critère effecteur, les gestes peuvent être classifiés en gestes d'excitation, en geste de modulation ou de modification et en geste de sélection, retrouvant ainsi la classification proposée précédemment par Gibet [Gibet, 1987] dans le paragraphe 4.2. Le critère de saisie se base sur des gestes cités par plusieurs autres auteurs [Napier, 1956] [Gibet, 1987] c'est à dire des gestes préhensiles ou non, des gestes avec ou sans saisie. En ce qui concerne les gestes sans saisie, Ramstein propose les gestes de percussion, les gestes de frottement et les gestes de butée. Pour les gestes avec saisie, il propose une classification selon le contact temporaire ou permanent. Il considère si le couplage homme-instrument est maintenu pendant une période permettant à l'objet de suivre le mouvement de la main ou si le contact a été rompu et l'objet a évolué indépendamment.

Enfin, dans l'analyse intrinsèque proposée par Ramstein [Ramstein, 1991], il s'intéresse aux conditions de production de geste par l'instrumentiste. Cependant, cette catégorie correspond plus au contrôle moteur qu'au geste au sens propre.

#### 4.4 Classification des gestes selon sa finalité

Dans [Cadoz, 1994], Cadoz définit une typologie du geste selon sa finalité. Dans cette classification, le geste a trois fonctions : la fonction épistémique, la fonction sémiotique et la fonction ergotique. La fonction épistémique est la fonction de connaissance sur l'environnement où la main est vue comme un organe de perception. La fonction sémiotique est la fonction d'émission d'information à destination de l'environnement où la main est vue comme un organe d'expression. Enfin, la fonction ergotique est la fonction instrumentale, d'action matérielle, de modification ou de transformation de l'environnement où la main est vue comme un organe d'action.

## 5 Typologie du geste dans le cadre du couplage homme-système haptique

Nous avons présenté précédemment les principaux modèles de préhension humaine définis dans différents domaines allant de la médecine à la robotique ainsi que les typologies du geste instrumentale définies dans le cadre de l'utilisation de l'ordinateur comme outil de création. Ces typologies tiennent compte du geste manuel en général et du geste instrumental mais ne tiennent pas compte complètement de l'interaction homme-système. Cela nous a conduit à définir une nouvelle typologie, plus adaptée à notre étude du couplage homme-système haptique.

Lors de l'analyse du geste dans la situation du couplage homme-objet en général et notamment dans le cadre de la simulation haptique, plusieurs aspects importants sont à prendre en considération. En premier lieu, nous devons considérer s'il s'agit d'un geste d'interaction, c'est à dire un geste impliquant un contact avec l'interface, et nous devons établir la durée du contact. En second lieu, nous classerons les gestes selon la préhension, l'énergie et la fréquence d'exécution.

## 5.1 Classification des gestes selon le contact avec l'environnement

### 5.1.1 Classification des gestes selon l'existence ou non du contact

Nous pouvons tout d'abord classer les gestes selon le contact avec l'environnement en gestes d'interaction et gestes de non interaction. Les gestes d'interaction correspondent à ceux où il existe une interaction ou un contact physique entre l'homme et l'environnement, par exemple lorsqu'il saisit ou touche un objet. Les gestes de non interaction correspondent aux gestes libres exécutés par l'homme sans aucun contact physique avec un objet quelconque, par exemple les gestes utilisés par le langage des signes ou en complément de la parole. Il est important de préciser que l'interaction et la préhension ne rentrent pas dans la même catégorie. En effet, lors de gestes non préhensibles, il peut y avoir une interaction, par exemple lorsqu'on pousse un objet ou lorsqu'on le touche pour explorer sa texture sans le saisir. Dans ces cas, l'objet n'est pas saisi mais il existe une interaction entre l'homme et l'objet. Notre étude étant centrée dans l'analyse du couplage homme-objet, plus précisément des systèmes haptiques, nous nous intéresserons ici uniquement aux gestes d'interaction. L'étude des gestes de non interaction reste tout de même très importante dans les domaines de la parole et de la cognition.

### 5.1.2 Classification des gestes selon la durée du contact

Les gestes peuvent être classifiés en gestes à contact permanent et à contact non permanent, suivant la classification établie par [Ramstein, 1991]. Si le contact entre l'homme et l'objet dure toute la période définie, le geste peut être considéré comme un geste à contact permanent. Dans le cas contraire, il appartiendra à la catégorie des gestes à contact non permanent. Selon l'hypothèse du THS pour l'analyse du couplage, nous nous intéresserons aux gestes considérés permanents lors de la durée de ce THS.

## 5.2 Classification des gestes selon la préhension

### 5.2.1 Classification des gestes selon la réalisation d'un geste de préhension

Comme décrit dans la section 5.1, le critère d'interaction ne nous donne pas des informations sur le caractère préhensible ou non préhensible de la tâche. Il est donc important de classer les gestes selon le critère de préhension ou de saisie. Nous considérons alors la classification classique des gestes selon la préhension définie par Napier dans [Napier, 1956], comme des gestes de préhension et de non préhension. Dans le cadre de la simulation haptique, nous avons pu observer que la plupart de gestes réalisés par l'homme pour interagir avec les interfaces haptiques concernent des gestes préhensibles, puisqu'en général l'homme saisit l'interface haptique afin de manipuler l'objet virtuel à travers par exemple un joystick, un bâton ou une manette. Cependant, cette interaction peut aussi être effectuée à travers des gestes non préhensibles notamment dans le cas des interfaces conçues avec des touches évoquant les touches d'un piano. En effet, l'homme interagit avec l'interface de la même façon que lorsqu'il joue cette instrument, c'est à dire avec un geste d'interaction non préhensible. Lors des expériences réalisées dans la deuxième partie de cette thèse, ces gestes d'interaction non préhensibles seront d'une très grande importance notamment pour l'analyse des gestes passifs constituant des gestes de l'homme.

### 5.2.2 Classification des gestes selon le mode de préhension

Comme défini dans la Section 3, les modes de préhension constituent un critère important de la description du geste de préhension. Dans le cadre de la simulation haptique, il existe de nombreuses interfaces,

permettant de reproduire une diversité de tâches allant de l'écriture à la chirurgie. Cependant la façon de saisir un objet reste restreinte notamment par les caractéristiques mécaniques de l'interface utilisée. Les modes de préhension les plus utilisés en haptique peuvent être classés selon la force et la précision requises pour la saisie, comme décrit dans la Section 3.5. Cependant les autres classifications décrites lors de ce chapitre peuvent être prise en compte pour la classification des gestes réalisés lors de l'interaction haptique, notamment la classification des gestes selon la forme de l'objet saisi.

### 5.3 Classification des gestes selon l'énergie

Un autre critère important lors de la classification des gestes est leur aspects énergétiques. Si le geste agit comme une source d'énergie, nous pouvons considérer ce geste comme un geste actif. La main est alors en mouvement pour interagir avec l'objet afin de connaître ses propriétés physiques et/ou de le manipuler. Par contre, lors d'un geste passif, il s'agit d'un geste inerte où la main est immobile mais où elle perçoit les stimulations externes. Lors de ce geste, l'homme peut également modifier ses paramètres en modifiant par exemple son tonus musculaire sans changer la position de sa main. Nous considérerons lors de l'analyse de couplage, des gestes actifs où l'homme agit comme générateur du mouvement, ainsi que des gestes passifs.

### 5.4 Classification des gestes selon la fréquence d'exécution

Comme défini par Ramstein [Ramstein, 1991], nous considérons la fréquence d'exécution du geste comme un critère pour sa classification. Cependant, nous ne sommes pas intéressés à la fréquence exacte des mouvements humains lors d'une tâche définie mais plutôt à sa répétition. Nous cataloguons ainsi les gestes en gestes périodiques et gestes non périodiques.

Les gestes périodiques sont ceux qui se répètent à chaque période de temps définie. Les gestes non périodiques sont ceux exécutés une seule fois ou qui ne se répètent pas à une fréquence particulière. Lors de l'étude du couplage, nous nous intéresserons particulièrement aux gestes périodiques. Ce type de gestes sont intéressants puisque la périodicité facilite leur analyse grâce à sa redondance d'informations.

## 6 Conclusion

Ce chapitre comporte un état de l'art et une analyse de la typologie du geste manuel de l'homme en situation naturelle, des gestes instrumentaux et des modes de préhension humaine. Nous avons observé les différentes classifications des modes de préhension proposés selon différents critères, tels la forme de l'objet saisi, la partie de la main utilisée pour la saisie ou la forme que celle-ci prend lors de la saisie d'un objet. Nous avons également décrit le geste instrumental, ainsi que ses différentes classifications.

Basée sur cette analyse, nous avons construit une typologie du geste adaptée à l'analyse du couplage homme-système haptique. Cette typologie est nécessaire pour la suite de cette thèse et notamment pour le choix des situations du couplage à analyser lors des expériences décrites dans la dernière partie de ce manuscrit.

Comme nous l'avons défini dans la Section 5, selon la typologie réalisée et selon nos hypothèses pour l'étude du couplage, nous avons choisi les gestes à analyser pour l'étude du couplage. Nous allons considérer les gestes impliquant un contact physique entre l'homme et l'environnement, que nous appelons des gestes d'interaction, préhensiles et non préhensiles. Comme défini dans la Section 5.2 lors de l'interaction avec la plupart des interfaces haptiques manuelles l'homme exécute des gestes préhensiles,

saisissant l'interface pour saisir à la fois un objet virtuel. Cependant, comme nous le verrons dans le Chapitre 4, pour l'analyse du couplage nous avons besoin d'une interaction, et pas forcément une préhension, puisque l'action de poser la main sur un dispositif haptique peut également constituer un couplage. Nous considérerons également les gestes actifs, agissant comme générateur de mouvement et les gestes passifs. Finalement, selon la fréquence d'exécution, nous nous intéresserons particulièrement aux gestes périodiques. De plus, il est important de noter que selon l'hypothèse du THS les gestes analysés seront considérés permanents lors de la durée de ce THS.

Dans le Chapitre suivant, basés sur la typologie du geste proposée et les choix des gestes pour l'analyse, nous définirons des modèles du couplage et nous étudierons des méthodes d'identification de paramètres permettant de les caractériser.

## Chapitre 4

# Modèles de couplage et méthodes pour l'identification de leurs paramètres

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>53</b>
<b>2</b>	<b>Modélisation de l'interaction dans le cas de mouvements périodiques</b>	<b>54</b>
2.1	Modèle basé sur l'équation de Van der Pol	55
2.2	Modèle d'un objet virtuel actif	56
2.3	Définition des paramètres du dispositif haptique	58
2.4	Définition des paramètres de l'homme	59
<b>3</b>	<b>Description et validation des méthodes d'identification des paramètres du modèle basé sur l'équation de Van der Pol</b>	<b>61</b>
3.1	Méthode des Moindres Carrés (LSM)	61
3.2	Identification du modèle de Van der Pol par un filtre de Kalman-Bucy étendu (EKBF)	71
<b>4</b>	<b>Description et validation des méthodes pour l'identification des paramètres du modèle des oscillations auto-entretenues</b>	<b>82</b>
4.1	Estimation des paramètres du modèle virtuel	84
4.2	Estimation des paramètres de l'homme	88
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>90</b>

---

## 1 Introduction

Comme nous l'avons défini dans le Chapitre 2, notre étude du couplage homme-système haptique est basée sur l'hypothèse d'un système hybride temporaire considérant le système couplé comme un système dynamique ayant ses composantes inséparables.



Cette étude met en place des expériences dans une situation de simulation avec une interaction haptique. Les situations de couplage que nous étudions, découlent de la typologie du geste présentée dans le Chapitre 3. Notre étude se concentrera sur les gestes périodiques et sur les gestes passifs.

Nous proposons ainsi des modèles représentant le couplage homme-objet lors d'un geste périodique. Ces modèles sont à la fois utilisés pour l'analyse des gestes périodiques que pour l'analyse des caractéristiques passives du geste.

Les modèles de situations de couplage périodiques proposés dans ce chapitre sont ceux que nous utiliserons pour l'analyse des expériences du Chapitre 6. Lors de ces expériences, les systèmes couplés modélisés seront caractérisés et quantifiés dans une situation de simulation haptique. Nous estimerons ses paramètres à partir de mesures acquises par le simulateur temps réel lors d'une situation de couplage homme-système haptique, à l'aide de méthodes d'identification.

Dans ce chapitre, nous proposons deux modèles de couplage pour des situations périodiques : un modèle basé sur l'équation de Van der Pol et un modèle auto-oscillant. Nous présentons également deux méthodes d'identification de paramètres pouvant être utilisées pour caractériser ces modèles : la méthode des moindres carrés (LSM) et le filtre de Kalman étendu (EKF). Nous validerons ces méthodes à partir des données obtenues par simulation. Ces méthodes d'identification de paramètres seront ensuite utilisées dans le chapitre 6, afin de caractériser les modèles à partir des données réelles acquises lors des expériences de simulation haptique.

## 2 Modélisation de l'interaction dans le cas de mouvements périodiques

Pour l'analyse du THS, nous utilisons les mouvements périodiques c'est à dire les mouvements récurrents qui s'exécutent avec la même période de temps à chaque occurrence. Ce type de mouvement est intéressant à analyser puisque la périodicité facilite l'analyse grâce à sa redondance d'informations.

Les phénomènes périodiques sont répandus dans le monde inanimé de la physique et dans les organismes vivants [Bergé et al., 1988]. Les gestes périodiques sont très répandus dans la vie de tous les jours : dans la musique quand nous jouons un instrument ou dans d'autres tâches exécutées à l'aide d'un outil telles que marteler et visser.

Ces tâches périodiques présentent un comportement oscillant. Nous pouvons considérer deux cas de phénomènes oscillatoires dans le geste. Le premier cas est celui des oscillations produites par le système sensorimoteur humain dans lequel les caractéristiques temporelles sont complètement déterminées par l'action. Le mouvement dépend alors uniquement de la personne. Une telle situation existe dans le cas des mouvements lents, lorsque une personne saisit un objet pour le déplacer. Le second cas est celui des oscillations produites par une configuration spécifique de l'objet dans laquelle l'énergie est fournie par le mouvement mais dépend de l'objet. Un exemple est l'oscillation d'une craie sur un tableau quand elle est dirigée et saisie d'une certaine façon. Lorsque nous mettons la craie penchée et nous essayons de tracer une ligne, nous observons qu'une suite d'oscillations se produit. Le système moteur humain se comporte comme un générateur de vitesse constante et la combinaison de l'impédance de la main et de la friction non linéaire produit les oscillations.

A cause du comportement oscillant des tâches et des phénomènes périodiques [Mottet and Bootsma, 1999], il est possible d'utiliser les équations des oscillateurs pour les modéliser. Plusieurs modèles ont été conçus pour reproduire des comportements oscillatoires afin de comprendre, à partir des cycles limites,

la dynamique des phénomènes périodiques. Ils ont également été utilisés comme des contrôleurs, dans le cas de la locomotion et de la marche de robots [Aoi and Tsuchiya, 2005] [Ijspeert, 2001].

La modélisation des mouvements rythmiques humains comme des oscillateurs auto-entretenus occupe une place importante dans les recherches sur le contrôle moteur [Beek and Beek, 1988], [Mottet and Bootsma, 2001], [Mottet and Bootsma, 1999]. Ces approches supposent que le système nerveux central utilise une dynamique de cycle limite pour produire des mouvements rythmiques. Ces mouvements sont alors modélisés comme des oscillateurs et représentés par des équations différentielles ordinaires du second ordre [Delignières et al., 1999].

Notre objectif est de trouver le plus simple modèle capable de reproduire les effets observés dans le cas de mouvements périodiques générés par l'homme.

## 2.1 Modèle basé sur l'équation de Van der Pol

En général, le THS est évolutif. Dans le cas des mouvements oscillatoires, l'objectif est donc d'accorder à chaque phase stationnaire d'oscillation, une série de paramètres constants du THS.

Le plus simple modèle capable de générer des oscillations stationnaires est l'oscillateur harmonique :

$$m_0 \ddot{x} + kx = f \quad (4.1)$$

où  $m_0$  est la masse,  $k$  est la raideur et  $x$  est le déplacement. Dans ce modèle, l'amplitude est déterminée par les conditions initiales. Une limitation fondamentale de ce type de système est la perte de ses propriétés de générer un comportement périodique une fois couplé avec un autre système présentant des dissipations. En effet, l'oscillateur conservatif ne peut être utilisé comme un modèle de génération de mouvement sinusoïdal que si son impédance (c'est à dire sa masse  $m_0$ ) est beaucoup plus élevée que l'impédance de la charge.

Pour surmonter cette limitation, nous devons choisir un modèle présentant différentes propriétés : une indépendance par rapport à l'état initial et une robustesse par rapport aux perturbations et au couplage avec des systèmes externes dissipatifs ou non dissipatifs.

Une dernière propriété liée à l'équation de l'évolution du système peut être ajoutée. En effet, cette équation doit être linéaire par rapport à ses paramètres afin de nous permettre l'identification de ses paramètres en utilisant la méthode des moindres carrés [Poignet and Gauthier, 2000].

De plus, nous avons choisi d'utiliser l'équation de l'oscillateur de Van der Pol [van der Pol, 1920] [Bergé et al., 1988] afin de modéliser le couplage main-système haptique lors de l'exécution d'un mouvement périodique. Cette équation (4.2) décrit un modèle simple capable de générer des phénomènes périodiques avec une amplitude fixe dépendant uniquement de ses paramètres et non de son état initial. Ce modèle est celui que nous proposons pour modéliser le THS associé à l'exécution d'un mouvement périodique sur un objet simple comme un objet virtuel viscoélastique.

Le comportement de l'oscillateur de Van der Pol est décrit par l'équation suivante [Bergé et al., 1988] :

$$\ddot{x}(t) - \gamma_0 \left[ 1 - \frac{x^2(t)}{x_0^2} \right] \dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = F(t) \quad (4.2)$$

où  $\gamma_0$  est le coefficient de friction tel que  $\gamma_0 > 0$ ,  $x_0$  est l'amplitude de référence,  $\omega$  est la fréquence et  $F(t)$  est la force d'entrée [Bergé et al., 1988]. L'oscillateur de Van der Pol est auto-entretenu lorsque  $F(t) = 0$ .

## 2.2 Modèle d'un objet virtuel actif

Nous utilisons l'approche du THS pour analyser les caractéristiques du couplage lors de l'interaction haptique c'est à dire lorsque un homme manipule un objet virtuel à travers une interface haptique. L'action est donc réalisée par l'homme exécutant un geste actif sur un objet virtuel passif. Cependant, nous pouvons décomposer ce geste actif en deux différentes parties : une composante active agissant comme un générateur de mouvement et une composante passive correspondant à la modification de paramètres tels que la raideur, la viscosité et l'inertie qui peuvent être contrôlées en variant le tonus musculaire. Nous pouvons donc poser comme hypothèse que la composante passive du geste est présente non seulement en combinaison avec le générateur du mouvement dans les gestes actifs mais également dans des gestes purement passifs avec uniquement des composantes passives. En effet, lorsque nous posons la main sur une surface, elle peut être soit relaxée soit avec une très forte raideur, tout en gardant la même position. Les composantes passives du geste sont modifiées mais pas le geste lui-même.

En considérant un système couplé homme-objet virtuel, nous pouvons analyser les caractéristiques passives du geste. Notre méthode consiste à transférer à l'objet virtuel, la composante active générant le mouvement et naturellement présente dans l'homme. L'objet virtuel est alors composé d'une partie active agissant comme un générateur de mouvement et d'un élément viscoélastique linéaire passif. Nous cherchons désormais à implémenter un modèle simple capable de reproduire les effets observés dans les mouvements générés par l'homme, par exemple la même amplitude et la même fréquence. Si la composante active est dans l'objet virtuel, le geste effectué pour manipuler le dispositif haptique pourra être considéré passif.

L'objectif de cette expérience est de mettre en évidence l'existence des composantes passives du geste. En prenant en compte notre hypothèse et en utilisant un objet virtuel actif, nous pouvons analyser les composantes passives d'un geste dans une situation de simulation haptique.

Pour effectuer cette analyse, le choix de l'objet virtuel actif reproduisant la situation décrite se pose à nous. Comme nous l'avons dit précédemment, les mouvements périodiques effectués par l'homme peuvent être modélisés comme des oscillateurs auto-entretenus [Beek and Beek, 1988], [Mottet and Bootsma, 2001], [Mottet and Bootsma, 1999]. Considérant le cas des gestes périodiques, l'objectif est donc de représenter un générateur de mouvement tel que l'objet virtuel actif puisse être modélisé comme un oscillateur auto-entretenu. Ils peuvent ainsi être représentés par des équations différentielles du second ordre.

De plus, nous décrivons ci-dessous, la modélisation de l'objet actif virtuel qui sera utilisé pour l'analyse expérimentale des composantes passives du geste. Cette analyse est basée sur l'hypothèse d'un système couplé homme-objet virtuel considéré comme un THS.

Nous proposons alors un objet virtuel composé de deux parties :

- une partie active représentée par une fonction non linéaire agissant comme un générateur de mouvement.
- une partie passive représentée par un système ressort-viscosité agissant comme un objet virtuel passif.

L'implémentation de cet objet virtuel actif dans le simulateur haptique utilisé, produit un mouvement périodique auto-entretenu de la touche du dispositif. En suivant le mouvement produit par l'objet virtuel, l'homme peut exécuter un geste passif.

Dans le chapitre 6, nous analyserons les caractéristiques de ce geste passif en mesurant le système couplé homme-objet virtuel. En effet, nous demanderons à un sujet de mettre son doigt sur la touche du dispositif haptique et de modifier son comportement passif en modifiant son tonus musculaire sans changer de position.

Nous allons maintenant définir les deux parties composant l'objet virtuel. L'équation de la force retournée par la composante viscoélastique passive de l'objet virtuel à l'interface haptique est donnée par :

$$F_{OV} = K_{OV}x + B_{OV}\dot{x} \quad (4.3)$$

Où  $K_{OV}$  et  $B_{OV}$  représentent respectivement la raideur et la viscosité de la partie passive de l'objet virtuel.

L'équation (4.3) représente donc l'objet virtuel passif manipulé.

Pour le choix de la partie active de l'objet virtuel, l'objectif est de trouver un modèle capable de reproduire les mouvements de la main. Ces mouvements doivent être similaires à ceux exécutés par l'homme lorsqu'il manipule un objet. Nous nous intéressons toujours à une situation où le geste est périodique et nous cherchons un objet virtuel actif simple réunissant les conditions décrites précédemment et permettant à la main de garder un nombre maximal de degrés de liberté. Ce type de modèle est obtenu à partir d'un élément mécanique actif caractérisé par une loi force-vitesse ( $F - V$ ) non linéaire présentant une région avec une viscosité dynamique négative  $B_0$  de la forme suivante :

$$F_{NL1} = -B_0V \left( \frac{1 - V^2}{V_0^2} \right) \quad (4.4)$$

où  $V_0$  représente une vitesse de référence.

Cet élément peut aussi être considéré comme la combinaison d'un générateur de vitesse  $V_1$  et un élément mécanique passif non linéaire :

$$F_{NL2} = -B_0(V - V_1) \left( \frac{1 - V^2}{V_0^2} \right) + F_1 \quad (4.5)$$

Cependant, ce modèle est représenté par une courbe de forme parabolique équivalente à une viscosité non bornée qui tends vers l'infini lorsque la vitesse  $V$  augmente. Ce comportement est incompatible avec la bande passante limitée du système et peut causer des instabilités caractérisées par des oscillations de grande amplitude. Une variation intéressante du modèle décrit dans (4.4) est donnée par :

$$F_{NL3} = -B_0 \left( \frac{V}{1 + \frac{V^2}{V_0^2}} \right) \quad (4.6)$$

où  $B_0 = F_0/V_0$  et  $F_0$  représente une force de référence.

Sachant que  $V = \dot{x}$ , nous obtenons la fonction non linéaire suivante :

$$F_{NL} = -F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left( \frac{\dot{x}}{V_0} \right)^2} \quad (4.7)$$

avec  $V_0 > 0$ ,  $V_0 \neq 0$  et  $F_0 < 0$ .

Nous choisissons pour représenter la partie active de l'objet virtuel ce dernier modèle, similaire à celui décrit dans (4.4) pour les vitesses faibles. Les modèles (4.4) et (4.6) sont équivalents au premier ordre quand la vitesse tend vers zéro. L'avantage de ce modèle est quand la force diminue, la vitesse augmente.

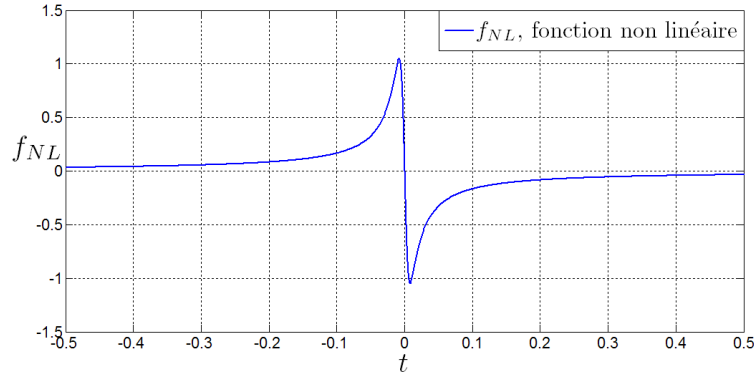


FIGURE 4.1 – Fonction non linéaire pour les paramètres  $F_0 = -2.16N$  et  $v_0 = 0.008 \frac{m}{s^2}$

Dans la Figure 4.1, nous pouvons observer la courbe de la fonction non linéaire décrite dans (4.7) pour les paramètres  $F_0 = -2.16N$  et  $v_0 = 0.008 \frac{m}{s^2}$ .

L'équation complète du modèle de l'objet virtuel actif qui pourra être utilisée pour représenter le système couplé homme-objet virtuel dans une situation de mouvements périodiques, est définie par :

$$F_{VI} = F_{OV} + F_{NL} \quad (4.8)$$

A partir de (4.3) et (4.7), l'équation (4.8) devient :

$$F_{VI} = \underbrace{K_{OV}x + B\dot{x}}_{\text{Force Objet Virtuel}} - \underbrace{F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{V_0}\right)^2}}_{\text{Force Fonction non linéaire}} \quad (4.9)$$

Le modèle défini par (4.9) sera implanté dans le simulateur temps réel et sera utilisé dans les expériences décrites dans le chapitre 6 pour l'analyse des composantes passives du geste et pour la caractérisation du dispositif haptique.

### 2.3 Définition des paramètres du dispositif haptique

Lorsque l'objet virtuel actif défini par (4.9) est implanté dans le simulateur haptique, il fait osciller la touche du Transducteur Gestuel Rétroactif (TGR). Ce dispositif haptique sera décrit de façon détaillée dans le Chapitre 5.

Afin d'utiliser ce modèle d'objet virtuel pour l'analyse du geste et de comparer les résultats obtenus lors de la simulation Matlab et de la simulation temps réel, nous devons également prendre en compte les caractéristiques du TGR pour la construction du modèle général.

Le modèle de l'objet virtuel actif défini précédemment pourra être utilisé comme un outil pour identifier les paramètres du dispositif haptique. En effet, si nous utilisons cet objet virtuel actif provoquant des oscillations sur le TGR avec des paramètres connus, nous pouvons, en utilisant des techniques d'identification de paramètres, trouver les caractéristiques du TGR.

Si nous modélisons le TGR comme une masse  $m_{TGR}$  et probablement une viscosité  $b_{TGR}$ , la force du TGR sera alors définie par :

$$F_{TGR} = m_{TGR}\ddot{x} + b_{TGR}\dot{x} \quad (4.10)$$

Cette force du TGR,  $F_{TGR}$ , est égale en magnitude à la force  $F_{VI}$  envoyée par le modèle virtuel sur le dispositif mais lui est opposée. Comme le montre l'équation suivante, la somme des forces du système est donc nulle :

$$F_{TGR} + F_{VI} = 0 \quad (4.11)$$

Enfin, à partir de (4.9), (4.10) et (4.11), le modèle TGR-objet virtuel est défini par :

$$\underbrace{m_{TGR}\ddot{x} + b_{TGR}\dot{x}}_{\text{Force TGR}} + \underbrace{B_{OV}\dot{x} + K_{OV}x}_{\text{Force Objet Virtuel}} - \underbrace{F_0 \frac{\dot{x}}{v_0}}_{\text{Force Fonction non linéaire}} = 0 \quad (4.12)$$

Ce modèle sera utilisé dans le Chapitre 6 pour la caractérisation du TGR. Il est illustré dans la Figure 4.2.

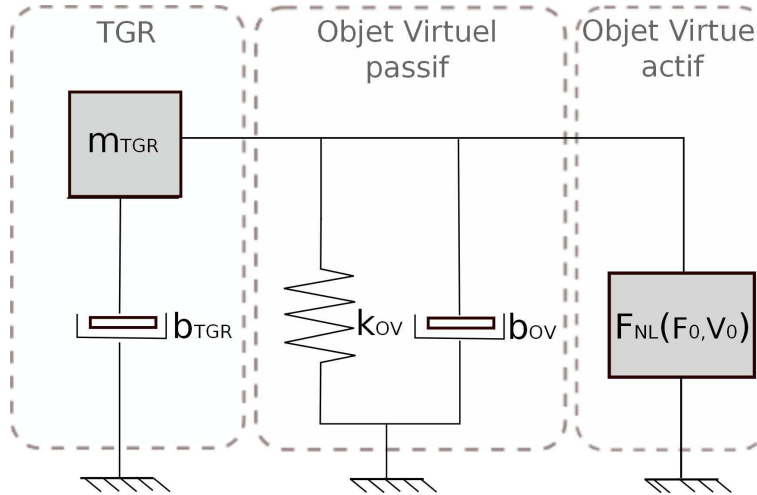


FIGURE 4.2 – Modèle TGR-objet virtuel

## 2.4 Définition des paramètres de l'homme

Dans le cadre des expériences présentées dans le Chapitre 6, nous avons besoin de définir un modèle de l'homme et de l'ajouter au modèle général défini dans (4.12) composé de l'objet virtuel et du dispositif haptique. Ceci nous permettra d'identifier les composantes passives du geste de l'homme.

L'homme peut être modélisé comme un système mécanique masse-ressort-frottement. Ce type de modélisation est courant dans les études de la biodynamique de l'homme.

Dans [Rakheja et al., 2002], les auteurs proposent une comparaison des modèles biodynamiques du système main-bras pour des applications utilisant des outils électriques portatifs. Dans [Kazi et al., 2008],

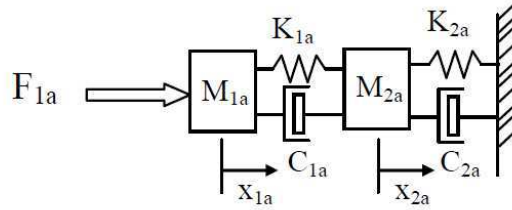
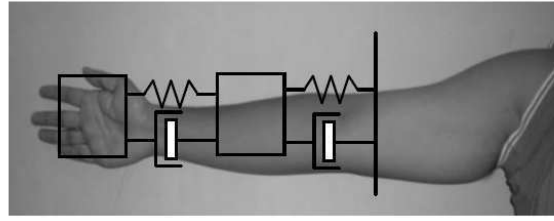


FIGURE 4.3 – Modèle main-bras à 2 degrés de liberté [Kazi et al., 2008]

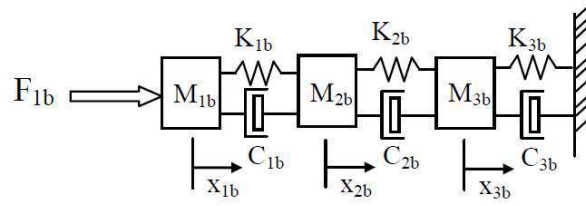
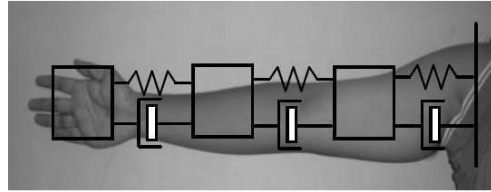


FIGURE 4.4 – Modèle main-bras à 3 degrés de liberté [Gurram et al., 1995]

les auteurs décrivent deux modèles mécaniques pouvant représenter la dynamique du système main-bras de l'homme : un système à deux degrés de liberté et l'autre à trois proposé initialement dans [Gurram et al., 1995]. Ces modèles sont montrés respectivement dans les Figures 4.3 et 4.4.

Basé sur ces modèles biodynamiques du système main-bras humain, nous considérons que l'homme peut être modélisé comme un système mécanique c'est à dire un système masse-ressort-viscosité. Pour notre analyse du geste passif, nous ne nous intéressons ni aux mouvements ni aux degrés de liberté du système main-bras. Nous choisissons donc un modèle simple composé seulement d'une masse, d'un ressort et d'un frottement, comme le montre la Figure 4.5.

Nous définissons alors les paramètres de l'homme comme sa masse  $m_H$ , sa viscosité  $b_H$  et sa raideur  $k_H$ . La force du système est alors définie par la formule suivante :

$$F_H = m_H \ddot{x} + b_H \dot{x} + k_H x \quad (4.13)$$

En ajoutant ce modèle de l'homme décrit dans (4.13) au modèle général TGR-objet virtuel décrit dans (4.12),

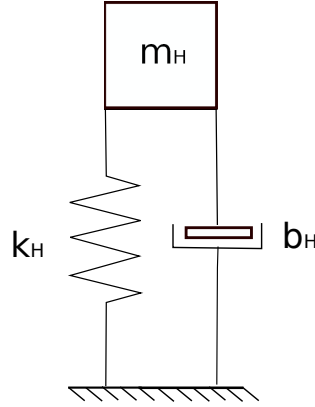


FIGURE 4.5 – Modèle de l'homme pour l'analyse du geste passif

nous obtenons :

$$\underbrace{m_H \ddot{x} + b_H \dot{x} + k_H x}_{\text{Force homme}} + \underbrace{m_{TGR} \ddot{x} + b_{TGR} \dot{x}}_{\text{Force TGR}} + \underbrace{B_{OV} \dot{x} + K_{OV} x}_{\text{Force Objet Virtuel}} - \underbrace{F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{v_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{v_0}\right)^2}}_{\text{Force Fonction non linéaire}} = 0 \quad (4.14)$$

En regroupant ses paramètres, l'équation (4.14) devient :

$$(m_H + m_{TGR}) \ddot{x} + (b_H + b_{TGR} + B_{OV}) \dot{x} + (k_H + K_{OV} x) - F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{v_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{v_0}\right)^2} = 0 \quad (4.15)$$

Ce modèle représente le couplage homme-système haptique-objet virtuel que nous utiliserons dans le Chapitre 6 pour l'analyse du geste passif. Il est illustré dans la Figure 4.6.

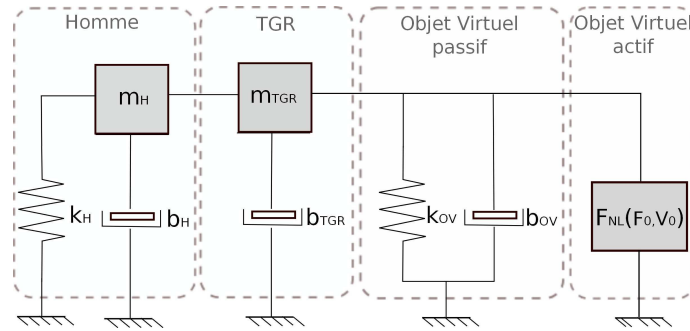


FIGURE 4.6 – Modèle général pour l'analyse du geste passif

### 3 Description et validation des méthodes d'identification des paramètres du modèle basé sur l'équation de Van der Pol

#### 3.1 Méthode des Moindres Carrés (LSM)

Comme première approche pour l'identification des paramètres du modèle proposé, nous présentons la méthode des moindres carrés basée sur une régression linéaire. Cette méthode peut être utilisée en



considérant que l'équation du modèle est linéaire par rapport à ses paramètres [Lacy and Bernstein, 2003], [Poignet and Gauthier, 2000], [Ljung and Söderström, 1983].

Dans le cas de l'équation de Van der Pol, nous devons la traiter avec une estimation des paramètres constants. Si tous les états sont considérés mesurables, c'est à dire  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  et  $\ddot{x}(t)$  sont connus pour tout  $t$ , l'équation de l'oscillateur de Van der Pol (4.2) auto-entretenu peut être formulée comme une régression linéaire :

$$x(t) = -\frac{1}{\omega^2}\ddot{x}(t) + \frac{\gamma_0}{\omega^2} \left[ 1 - \frac{x^2(t)}{x_0^2} \right] \dot{x}(t) + \frac{F(t)}{\omega^2} \quad (4.16)$$

Cette régression linéaire peut être exprimée de façon plus générale par :

$$y_0(t) = \theta^T \phi(t) \quad (4.17)$$

où  $\phi(t)$  est le vecteur des données d'entrée-sortie,  $\theta$  est le vecteur des paramètres et  $y_0(t)$  est la sortie du modèle.

Si une perturbation  $v(t)$ , par exemple du bruit blanc, est présente dans le système, la variable observée  $y(t)$  est donnée par :

$$y(t) = y_0(t) + v(t) \quad (4.18)$$

L'équation (4.18) décrit la variable observée  $y(t)$  comme une combinaison linéaire des composantes du vecteur observé  $\phi(t)$  plus du bruit  $v(t)$  [Ljung and Söderström, 1983]. Ce type d'équation est connu comme une régression linéaire en statistique. Les composantes de  $\phi(t)$  sont appelées *variables de régression* ou *régresseurs*.

Dans notre étude, la variable observée  $y(t)$  correspond au vecteur des positions mesurées  $x(t)$ . Si nous considérons que les trois paramètres de l'équation de Van der Pol ( $\gamma_0$ ,  $\omega$  et  $x_0$ ) sont inconnus, le régresseur  $\phi(t)$  et le vecteur de paramètres  $\theta$  sont donnés par les équations suivantes :

$$\phi(t) = (-\ddot{x}(t), \dot{x}(t), -x^2(t)\dot{x}(t))^T \quad (4.19)$$

$$\theta = \left( \frac{1}{\omega^2}, \frac{\gamma_0}{\omega^2}, \frac{\gamma_0}{\omega^2 x_0^2} \right)^T \quad (4.20)$$

Cette régression linéaire peut être résolue en utilisant une méthode d'identification classique telle que la méthode des moindres carrés [Ljung and Söderström, 1983]. Le vecteur des paramètres  $\theta$  est alors estimé à partir des mesures  $\phi(t)$  de  $y(t)$  pour  $t = 1, 2, \dots, N$ .

Cette estimation peut être effectuée en minimisant la fonction critère donnée par :

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha_t \left[ y(t) - \theta^T \phi(t) \right]^2 \quad (4.21)$$

où  $\alpha_t$  est une séquence de nombres positifs. Ce critère est minimisé par rapport à  $\theta$ .

Cette méthode vise à identifier les paramètres du système à partir d'une mesure de l'amplitude des oscillations. Cependant, nous pouvons utiliser n'importe quelle autre mesure, comme la vitesse, en fonction des matériels disponibles et de l'expérience implémentée. Dans notre étude basée sur l'équation de Van der Pol, nous identifions les paramètres du système à partir des données de positions mesurées. Le vecteur de paramètres  $\theta$  est alors estimé à partir des mesures de  $x(t)$  et du vecteur  $\phi(t)$  pour tout  $t$ . La vitesse  $\dot{x}(t)$  et l'accélération  $\ddot{x}(t)$  sont calculées à partir des données de positions acquises  $x(t)$  en utilisant une méthode de différentiation numérique comme décrite dans la Section 3.1.2.

### 3.1.1 Simulations et résultats pour le modèle de Van der Pol classique en utilisant la méthode des moindres carrés : Cas sans bruit

Le premier cas à analyser est celui sans bruit. Celui-ci nous permet de valider la méthode d'identification en absence d'une perturbation externe.

Comme nous l'avons décrit précédemment, la méthode proposée vise à identifier les paramètres du système à partir d'une mesure de l'amplitude des oscillations  $x$ . Pour obtenir la valeur de l'amplitude des oscillations  $x$ , nous réalisons des simulations du modèle de Van der Pol décrit par l'équation (4.2) en utilisant MATLAB-Simulink.

Pour ces simulations, nous définissons trois groupes de paramètres :

- Groupe 1 :  $\gamma = 1, \omega = 1.5, x_0 = 2.5$
- Groupe 2 :  $\gamma = 0.8, \omega = 2, x_0 = 3.5$
- Groupe 3 :  $\gamma = 0.5, \omega = 3, x_0 = 4.5$

Nous avons choisi ces trois groupes car ils illustrent le comportement du modèle de Van der Pol en fonction de la variation de ses paramètres. Ces trois groupes de paramètres seront utilisés pour les simulations et pour les estimations de paramètres décrites dans les sections suivantes.

Dans la Figure 4.7, nous pouvons observer les amplitudes des oscillations  $x(t)$  obtenues lors des simulations du modèle de Van der Pol sans bruit, pour les trois groupes de paramètres définis précédemment.

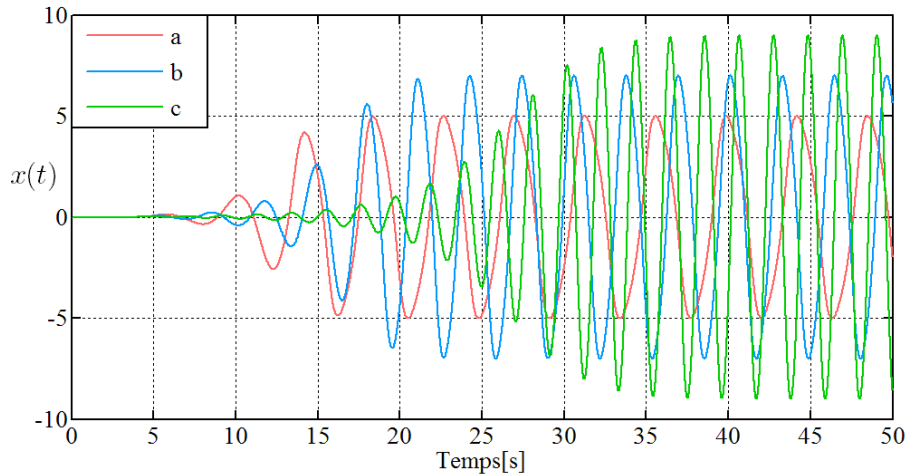


FIGURE 4.7 – Résultats de simulation du modèle de Van der Pol sans bruit pour les paramètres : a) Groupe 1 :  $\gamma = 1, \omega = 1.5, x_0 = 2.5$  b) Groupe 2 :  $\gamma = 0.8, \omega = 2, x_0 = 3.5$  c) Groupe 3 :  $\gamma = 0.5, \omega = 3, x_0 = 4.5$

Nous pouvons observer dans la Figure 4.7, l'influence des paramètres de l'équation de Van der Pol. Nous pouvons observer comment l'amplitude de référence  $x_0$  influence l'amplitude des oscillations. Même si

les oscillations commencent avec de faibles valeurs, l'amplitude augmente et devient stable à environ  $2x_0$ . En augmentant  $\gamma$ , nous observons une déformation importante des oscillations.

En utilisant les résultats de simulation obtenus pour  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  et  $\ddot{x}(t)$  et suivant la méthode d'identification des moindres carrés décrite précédemment, nous construisons le vecteur  $\phi(t)$  et nous identifions les paramètres du système définis dans le vecteur  $\theta$ . Nous avons observé que les paramètres identifiés sont exactement les mêmes que les paramètres simulés. Cela est dû au fait que le modèle identifié est le même que celui simulé et qu'il n'y a pas de perturbations externes ni de bruit. Ces résultats constituent une première validation de la méthode d'identification. Dans la section 3.1.2, nous analyserons les résultats de l'identification lorsque nous ajoutons du bruit à la sortie du modèle.

### 3.1.2 Simulations et résultats pour le modèle de Van der Pol classique en utilisant la méthode des moindres carrés : Ajout du bruit au modèle

Afin d'analyser un cas plus proche d'identification des paramètres que celui avec des données réelles, nous avons ajouté du bruit au système simulé. Nous utilisons un bruit blanc dont nous allons varier la puissance.

Nous définissons les signaux de sortie par :

- $x$  : le signal contenant les valeurs de l'amplitude des oscillations sans bruit.
- $x_b$  : le signal  $x$  avec un bruit de mesure ajouté.

Nous analysons trois cas pour l'ajout du bruit :

- Cas 1 : le bruit de mesure est ajouté à la sortie du système comme montré dans la Figure 4.8. Dans ce cas, le bruit n'est pas introduit dans la boucle de simulation et nous pouvons récupérer le signal de position bruité  $x_b$  ainsi que la vitesse  $\dot{x}$  et l'accélération  $\ddot{x}$  non bruitées. En effet,  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  ne sont pas bruitées car elles sont calculées à partir du signal sans bruit  $x$ .

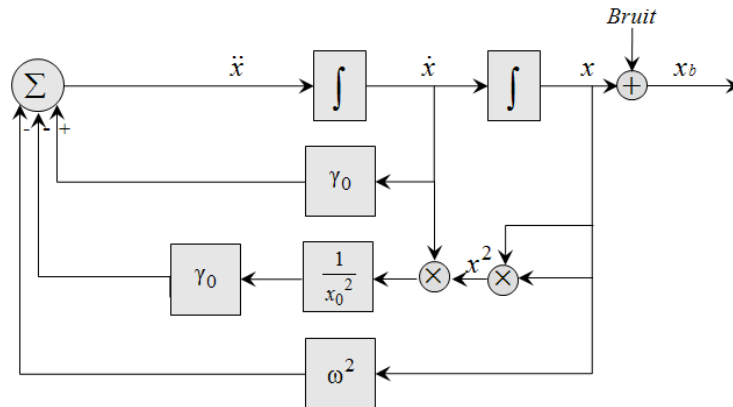


FIGURE 4.8 – Modèle du système avec ajout de bruit en sortie

- Cas 2 : le bruit est introduit dans la boucle de simulation comme montré dans la Figure 4.9. Nous récupérerons ainsi la position  $x_b$ , la vitesse  $\dot{x}_b$  et l'accélération  $\ddot{x}_b$  bruitées.
- Cas 3 : le bruit est ajouté à la sortie du système comme pour le premier cas. Cependant, le vecteur  $\phi$  est construit en calculant la vitesse et l'accélération à partir des données obtenues pour  $x_b$  lors de la simulation, en utilisant une méthode de différentiation numérique.

Les deux premières méthodes sont les plus simples puisqu'elles peuvent être réalisées directement à partir des données issues de la simulation. Dans les deux premier cas, le vecteur  $\phi$  est construit avec les données de position  $x_b$ , de vitesse,  $\dot{x}$  ou  $\dot{x}_b$ , et d'accélération,  $\ddot{x}$  ou  $\ddot{x}_b$ , obtenues lors de la simulation.

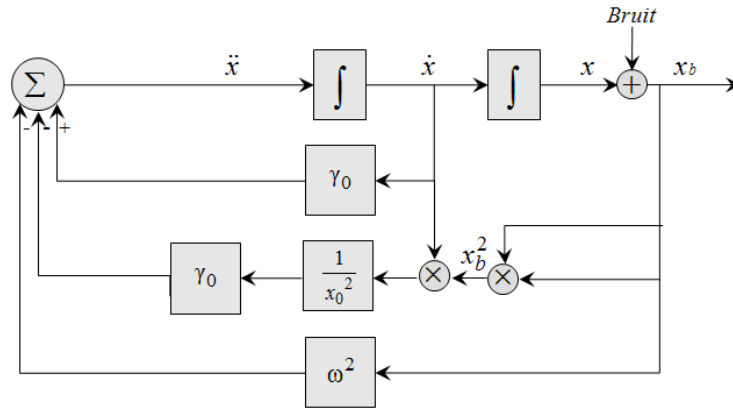


FIGURE 4.9 – Modèle du système avec ajout de bruit dans la boucle de simulation

La troisième méthode se rapproche néanmoins plus de celle utilisée dans le cas de l'acquisition des données réelles où nous récupérons, par exemple, des données de position en utilisant des instruments de mesure et où nous calculons la vitesse et l'accélération par dérivation des positions acquises.

Nous détaillerons en premier lieu, les méthodes utilisées pour le calcul des dérivées, la dérivée d'une variable bruitée et son filtrage. Ensuite, nous validerons notre méthode à travers les résultats et l'analyse des trois différents cas.

### 3.1.2.1 Méthodes utilisées pour le calcul des dérivées

Dans le cas 3 où nous choisissons de construire le vecteur  $\phi$  en utilisant la vitesse  $\dot{x}$  et l'accélération  $\ddot{x}$  calculées en dérivant la position  $x$ , nous devons définir la méthode de différenciation à utiliser pour le calcul de ces dérivées.

Les méthodes suivantes peuvent être utilisées pour la différenciation numérique [Gerald and Wheatly, 2003] :

- Approximation par une différence avant (Forward-difference)
- Approximation par une différence arrière (Backward-difference)
- Approximation par une différence centrale (Central-Difference)

La dérivée d'une fonction  $f(x)$  au point  $x = a$  est définie par :

$$f'(a) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x} \quad (4.22)$$

Si la valeur de  $\Delta x$  est très faible, un ordinateur peut facilement calculer une approximation de la dérivée en utilisant cette formule :

$$f'_a = \frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x} \quad (4.23)$$

Cette méthode est appelée approximation par une différence avant puisque pour la calculer, nous utilisons l'information de  $f$  au point  $a$  et l'information au point suivant  $a + \Delta x$ .

L'approximation par une différence arrière peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$f'(a) = \frac{f(a) - f(a - \Delta x)}{\Delta x} \quad (4.24)$$

Dans ce cas, nous utilisons l'information de  $f$  au point  $a$  mais également l'information au point précédent  $a - \Delta x$ .

Avec les deux premières méthodes, les résultats obtenus sont similaires.

Quant à la méthode de la différence centrale, elle est définie par :

$$f'(a) = \frac{(f(a + \Delta x) - f(a - \Delta x))}{2\Delta x} \quad (4.25)$$

Sa dérivée au point  $a$  est calculée en utilisant les informations du point précédent  $a - \Delta x$  et du point suivant  $a + \Delta x$ .

Dans la suite, nous utiliserons la méthode de la différence centrale pour estimer les dérivées car nous tendons plus rapidement vers la solution [Gerald and Wheatly, 2003].

### 3.1.2.2 Dérivée d'une variable bruitée

Quelque soit la méthode utilisée pour calculer les dérivées de  $x_b$  ( $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$ ), nous observons que la différentiation dégrade le rapport signal sur bruit.

Le SNR est défini comme le rapport entre la puissance du signal  $P_s$  et la puissance du bruit  $P_b$ . Il peut être exprimé en  $dB$  :

$$SNR = 10 \log \frac{P_s}{P_b} \quad (4.26)$$

Le SNR exprime la puissance du signal par rapport à celle du bruit :

- Si le SNR est positif, le signal est plus puissant que le bruit.
- Si le SNR est nul, le signal à la même puissance que le bruit.
- Si le SNR est négatif, le bruit est plus puissant que le signal.

Le Tableau 4.1 montre les SNR pour les trois groupes de paramètres selon la puissance de bruit ajouté :

Groupe	$P_s$	SNR avec $P_b = 10$	SNR avec $P_b = 1$	SNR avec $P_b = 0.01$
1	9.2293	-0.3483	9.6517	29.6517
2	16.2359	2.1048	12.1048	32.1048
3	17.3446	2.3916	12.3916	32.3916

TABLEAU 4.1 – SNR des trois groupes de paramètres selon la puissance du bruit choisie

Dans la Figure 4.10, nous observons la position bruitée  $x_b$  correspondant à la somme entre la position  $x$  obtenue lors de la simulation pour les paramètres du groupe 3 ( $\gamma = 0.5$ ,  $\omega = 3$ ,  $x_0 = 4.5$ ) et un bruit de faible puissance ( $P_n = 0.01$ ,  $SNR = 32.3916$ ). Nous pouvons également observer les signaux  $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$  obtenus en dérivant  $x_b$  par la méthode de la différence centrale (en rouge). Ces résultats sont comparés avec les courbes  $x$ ,  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  correspondantes, obtenues à partir d'une simulation sans bruit (en bleu). Nous remarquons que même en ajoutant un bruit de faible puissance, le bruit s'amplifie pour la première et la deuxième dérivée.

Cette augmentation du bruit rend difficile l'estimation des paramètres. Nous avons donc besoin de filtrer le bruit du signal pour obtenir de bonnes approximations de  $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$ , et par conséquent une bonne estimation des paramètres. En effet, il nous est impossible d'identifier les signaux bruités avec succès sans les filtrer.

Il est donc essentiel d'utiliser un filtrage avant la différentiation pour contrôler le rapport signal sur bruit.

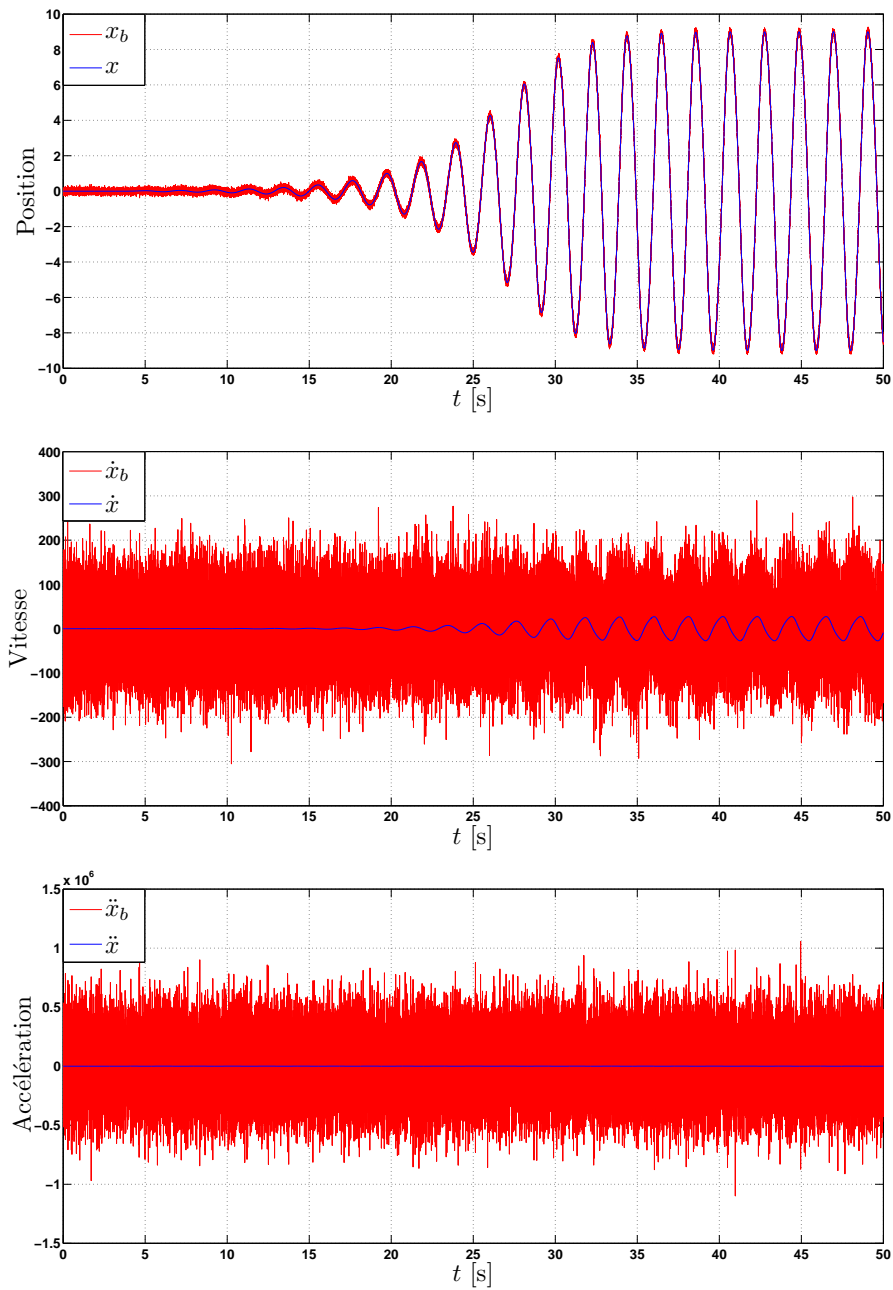


FIGURE 4.10 – Comparaison entre les variables  $x$ ,  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  issues de la simulation sans bruit et les variables bruitées  $x_b$ , ainsi que  $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$  obtenues par dérivation de  $x_b$ , pour les paramètres du groupe 3 :  $\gamma = 0.5$ ,  $\omega = 3$ ,  $x_0 = 4.5$

### 3.1.2.3 Filtrage

Pour filtrer le signal bruité  $x_b$  et ses dérivées  $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$ , nous utilisons un filtre numérique non causal de phase zéro c'est à dire un filtre de Butterworth aller-retour.

Nous utilisons, dans notre cas, un filtre passe-bas d'ordre 2.

Dans la Figure 4.11, nous observons les signaux  $x_{bf}$ ,  $\dot{x}_{bf}$  et  $\ddot{x}_{bf}$  correspondant aux signaux filtrés de  $x_b$ ,  $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$ , montrés dans la Figure 4.10. Ils sont comparés avec les signaux obtenus lors de la simulation sans bruit  $x$ ,  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  pour les paramètres du groupe 3 :  $\gamma = 0.5$ ,  $\omega = 3$ ,  $x_0 = 4.5$ .

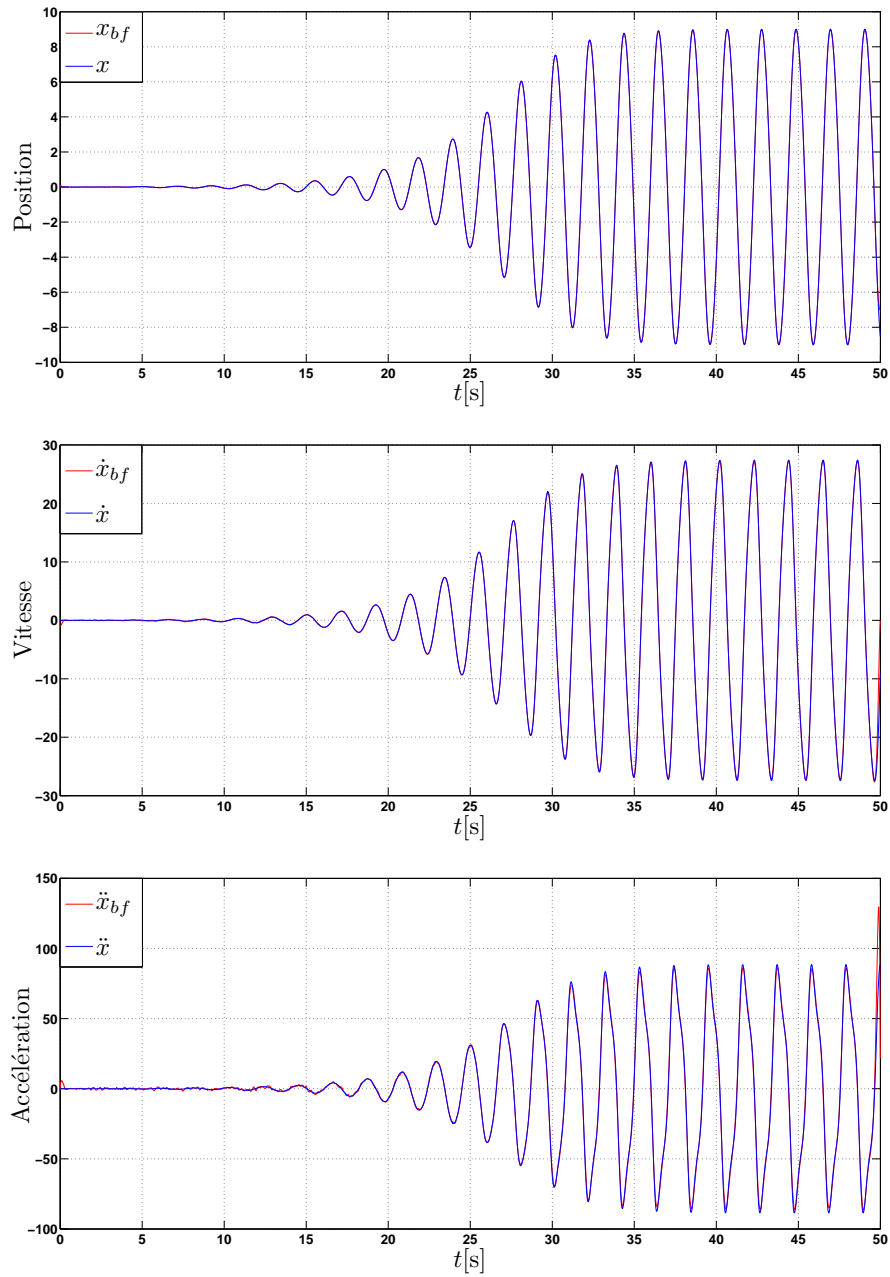


FIGURE 4.11 – Comparaison entre les signaux filtrés  $x_{bf}$ ,  $\dot{x}_{bf}$  et  $\ddot{x}_{bf}$  et les signaux obtenus lors de la simulation sans bruit  $x$ ,  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  pour les paramètres du groupe 3 :  $\gamma = 0.5$ ,  $\omega = 3$ ,  $x_0 = 4.5$

Nous remarquons qu'il est possible d'enlever la plupart du bruit du signal  $x_b$  en le filtrant. Lorsque nous calculons les dérivées à partir du signal filtré  $x_{bf}$ , les bruits présents dans les signaux  $\dot{x}_b$  et  $\ddot{x}_b$  se réduisent considérablement. Ces variables filtrées sont utilisées pour construire le vecteur de mesures  $\phi$ . Par conséquent, les résultats obtenus lors de l'identification de paramètres dépendent du filtre utilisé.

#### 3.1.2.4 Résultats du cas 1 : le bruit est ajouté à la sortie du modèle, qu'à la position

Dans ce cas, nous récupérons de la simulation la variable bruitée  $x_b$  et les variables  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  calculées à partir de la variable sans bruit  $x$ .

Nous réalisons l'identification des paramètres en utilisant des bruits de différentes puissances. Comme le

montre le Tableau 4.1, différentes valeurs de SNR sont obtenues selon le groupe de paramètres analysé. Nous utiliserons les mêmes valeurs pour analyser les comportements dans les autres cas.

Si nous réalisons l'identification des paramètres sans filtrer le signal bruité  $x_b$ , les résultats et les erreurs relatives de ces estimations pour les trois groupes de paramètres définis précédemment, sont montrés dans le Tableau 4.2.

Pour calculer l'erreur relative, nous devons calculer l'erreur absolue. Pour un paramètre  $p$  donné et un paramètre estimé  $\hat{p}$ , l'erreur absolue est définie par :

$$E_a = \hat{p} - p \quad (4.27)$$

Si  $p \neq 0$ , l'erreur relative est obtenue avec la formule suivante :

$$E_r = \frac{|\hat{p} - p|}{|p|} \quad (4.28)$$

Elle peut également être exprimée en pourcentage ( $\%E_r = E_r * 100$ ).

PARAMÈTRES			$P_b = 10$		$P_b = 1$		$P_b = 0.01$	
GROUPE	$p$	$p$ SIMULÉE	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$
1 : ( $P_s = 9.2293$ )	$\gamma$	1	0.2533	74.67	0.9602	3.98	0.9602	3.98
	$\omega$	1.5	1.7739	18.26	1.5220	1.47	1.5220	1.47
	$x_0$	2.5	3.7535	50.14	2.5031	0.12	2.5031	0.12
2 : ( $P_s = 16.2359$ )	$\gamma$	0.8	0.3439	57.01	0.6674	16.57	0.8010	0.12
	$\omega$	2	2.1197	5.98	2.0340	1.70	1.9997	0.02
	$x_0$	3.5	4.9059	40.17	3.6561	4.46	3.5026	0.07
3 : ( $P_s = 17.3446$ )	$\gamma$	0.5	0.2585	48.29	0.4649	7.02	0.5014	0.28
	$\omega$	3	3.0650	2.17	3.0172	0.57	3.0011	0.04
	$x_0$	4.5	5.8648	30.33	4.6186	2.64	4.4990	0.02

TABLEAU 4.2 – Identification des paramètres du modèle de Van der Pol : Cas 1 sans filtrage

A partir du Tableau 4.2, nous pouvons noter que si l'identification est effectuée sans filtrer le signal  $x_b$ , il y a une grande différence entre les paramètres simulés et les paramètres estimés. Cette différence augmente lorsque nous fixons une puissance de bruit plus élevée. Par exemple, avec une puissance de bruit égale à 10 et en simulant les paramètres du groupe 1 où  $\gamma = 1$ , nous obtenons le paramètre estimé  $\gamma = 0.2533$  avec une erreur relative de 74.67% dans l'estimation de ce paramètre. Cependant, avec une puissance de bruit plus faible égale à 0.01, pour le même paramètre, nous obtenons une estimation  $\gamma = 0.9602$  avec une erreur de 3.98%. Nous observons clairement le besoin de filtrer les signaux bruités pour trouver une bonne estimation des paramètres.

Nous réalisons une nouvelle estimation des paramètres en filtrant le signal bruité  $x_b$ . Nous utilisons un filtre numérique non causal de phase zéro, comme décrit dans la Section 3.1.2.3. Les résultats de cette estimation sont montrés dans le Tableau 4.3. Nous observons que même lorsque la puissance du bruit est élevée et le SNR est bas, nous obtenons de bonnes estimations des paramètres avec des erreurs inférieures à 1%.

### 3.1.2.5 Résultats du cas 2 : le bruit est introduit dans la boucle de simulation

Dans ce deuxième cas, nous récupérons la position  $x_b$ , la vitesse  $\dot{x}_b$  et l'accélération  $\ddot{x}_b$  bruitées.

Les paramètres estimés correspondent aux paramètres simulés avec des erreurs relatives très basses (de l'ordre de  $10^{-5}$ ) pour les trois différentes valeurs de la puissance du bruit (10, 1 et 0.01). Nous avons



PARAMÈTRES			$P_b = 10$		$P_b = 1$		$P_b = 0.01$	
GROUPE	$p$	$p$ SIMULÉE	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$
1 : ( $P_s = 9.2293$ )	$\gamma$	1	0.9964	0.36	0.9983	0.17	0.9987	0.13
	$\omega$	1.5	1.5015	0.10	1.5017	0.11	1.5019	0.12
	$x_0$	2.5	2.4990	0.04	2.4965	0.14	2.4957	0.17
2 : ( $P_s = 16.2359$ )	$\gamma$	0.8	0.8020	0.25	0.8016	0.19	0.8012	0.15
	$\omega$	2	2.0024	0.12	2.0023	0.11	2.0023	0.11
	$x_0$	3.5	3.5009	0.02	3.4979	0.06	3.4968	0.09
3 : ( $P_s = 17.3446$ )	$\gamma$	0.5	0.5031	0.6188	0.5016	0.33	0.5010	0.19
	$\omega$	3	3.0013	0.0447	3.0023	0.08	3.0028	0.09
	$x_0$	4.5	4.4933	0.15	4.4828	0.38	4.4786	0.47

TABLEAU 4.3 – Identification des paramètres du modèle de Van der Pol : Cas 1 avec filtrage

observé que même si nous augmentons la puissance du bruit, donc nous diminuons le SNR, les paramètres estimés restent très proches des paramètres simulés.

### 3.1.2.6 Résultats du cas 3 : introduction du bruit dans la position et déduction de la vitesse et de l'accélération par différentiation

Dans ce cas, nous récupérons de la simulation la variable bruitée  $x_b$ . La vitesse  $\dot{x}_{bf}$  et l'accélération  $\ddot{x}_{bf}$  sont calculées en dérivant le signal filtré de la position  $x_{bf}$ . Les résultats montrés dans le Tableau 4.4 ont été obtenus en filtrant  $x_b$  avant les dérivations en utilisant un filtre de Butterworth comme décrit précédemment pour les trois valeurs de la puissance du bruit (0.01, 1 et 10). Pour le groupe 1, nous observons que l'estimation est moins bonne lorsque  $P_b = 10$  puisque le SNR est négatif (SNR=-0.3483) donc le bruit est plus puissant que le signal. Pour l'estimation du paramètre  $\gamma$  dont la valeur simulée est  $\gamma = 1$ , nous obtenons une estimation de  $\gamma = 0.5178$  avec une erreur relative de  $Er = 48.21\%$  lorsque  $P_b = 10$ , contre une estimation de  $\gamma = 0.8612$  avec une erreur relative de  $Er = 13.88\%$  lorsque  $P_b = 0.01$ . Dans ces cas, le filtrage réalisé n'est pas suffisant pour enlever le bruit du signal.

Nous observons donc que les estimations obtenues dépendent fortement du filtre utilisé. Nous utiliserons cette méthode pour l'identification avec des données réelles. Dans la pratique, le filtre utilisé dépendra de la quantité du bruit présent dans le signal.

PARAMÈTRES			$P_b = 10$		$P_b = 1$		$P_b = 0.01$	
GROUPE	$p$	$p$ SIMULÉE	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$	$\hat{p}$ IDENTIFIÉ	$\%E_r$
1 : ( $P_s = 9.2293$ )	$\gamma$	1	0.5178	48.21	0.8225	17.74	0.8612	13.88
	$\omega$	1.5	1.7472	16.44	1.7314	15.42	1.5697	4.64
	$x_0$	2.5	2.2134	11.45	2.4181	3.27	2.4556	1.77
2 : ( $P_s = 16.2359$ )	$\gamma$	0.8	0.4832	39.59	0.7075	11.56	0.7266	9.17
	$\omega$	2	2.1613	8.06	2.0737	3.68	2.0036	0.18
	$x_0$	3.5	3.2789	6.31	3.4591	1.17	3.4877	0.35
3 : ( $P_s = 17.3446$ )	$\gamma$	0.5	0.2279	54.42	0.4269	14.62	0.4587	8.26
	$\omega$	3	3.1996	6.65	3.1237	4.12	3.0272	0.98
	$x_0$	4.5	4.0236	10.59	4.3912	2.42	4.4235	1.70

TABLEAU 4.4 – Identification des paramètres du modèle de Van der Pol : Cas 3

### 3.2 Identification du modèle de Van der Pol par un filtre de Kalman-Bucy étendu (EKBF)

L'équation de Van der Pol peut être utilisée pour la modélisation de différents systèmes caractérisés par un comportement oscillant. Une première approche que nous avons présentée, pour l'identification des paramètres de l'équation de Van der Pol est la méthode des moindres carrés basée sur une régression linéaire. Cette méthode peut être utilisée en considérant que l'équation de Van der Pol est linéaire par rapport à ses paramètres [Gautier and Poignet, 2001]. Nous proposons, dans cette section, une comparaison entre la méthode des moindres carrés décrite précédemment et le filtre de Kalman-Bucy étendu avec et sans bruit.

Comme décrit précédemment, l'équation de Van der Pol est définie par :

$$\ddot{x}(t) - \gamma_0 \left[ 1 - \frac{x^2(t)}{x_0^2} \right] \dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = F(t) \quad (4.29)$$

Où  $\gamma$  est le coefficient de friction tel que  $\gamma_0 > 0$ ,  $x_0$  est l'amplitude de référence,  $\omega$  est la fréquence et  $F(t)$  est la force d'entrée. L'oscillateur de Van Der Pol est auto-entretenu lorsque  $F(t) = 0$ .

#### 3.2.1 Filtre de Kalman-Bucy étendu classique

Nous effectuons une estimation simultanée des variables d'état d'un vecteur  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$  et des paramètres constants d'un vecteur  $\theta \in \mathbb{R}^m$ . Le but est d'évaluer l'estimation  $\hat{\mathbf{X}}$  d'un système non linéaire en utilisant l'observation d'une sortie probablement bruitée  $y$ . Son vecteur d'état étendu est le suivant :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{z} \\ \theta \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

tel que  $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n+m}$  et  $\dot{\theta} = 0$ .

En considérant que les constantes  $\gamma_0$ ,  $x_0$  et  $\omega$  inconnues, le vecteur de paramètres  $\theta$  à identifier est défini par :

$$\theta = \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ x_0 \\ \omega \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

Afin de représenter le système de Van der Pol dans l'espace d'état, nous définissons deux variables d'état  $z_1$  et  $z_2$  :

$$\begin{cases} z_1 = x \\ z_2 = \dot{x} \end{cases} \quad (4.32)$$

Le système de Van der Pol peut être alors modélisé dans l'espace d'état par :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = (\gamma_0 - \frac{\gamma_0}{x_0^2} z_1^2) z_2 - \omega^2 z_1 + F(t) \\ y = z_1 \end{cases} \quad (4.33)$$

Lorsqu'un système est bruité en sortie par  $\nu$ , sa sortie  $y$  peut être définie par :

$$y = z_1 + \nu \quad (4.34)$$

Nous pouvons considérer, en premier lieu, le problème de l'observation d'état pour le système décrit par l'équation (4.33) quand les trois paramètres  $\omega$ ,  $\gamma_0$  et  $x_0$  sont connus. Le signal étant  $y = z_1 = x$ , l'objectif est d'estimer l'état  $z_2 = \dot{x}$ . Le système peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}(y(t))\mathbf{z} \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{z} \end{aligned} \quad (4.35)$$

où  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^2$ , la matrice d'état  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  et la matrice d'observation  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$  sont définies par :

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & \gamma_0 - \frac{\gamma_0}{x_0^2} y^2(t) \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

Le système est variant dans le temps car sa matrice d'état dépend du temps  $A(y(t))$ . Nous avons alors besoin d'utiliser un observateur de Kalman évoluant dans le temps pour l'estimation des états.

Dans le cas d'une représentation des états avec des équations non linéaires continues, nous utilisons le filtre de Kalman-Bucy étendu (EKBF).

L'erreur d'estimation est donnée par :

$$\epsilon = \mathbf{z}(t) - \hat{\mathbf{z}}(t) \quad (4.38)$$

Dans cette équation,  $\mathbf{z}$  désigne notre état et  $\hat{\mathbf{z}}$  son estimation.

Les équations de la mise à jour des états pour l'observation du modèle de Van der Pol sont définies par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 z_2 + \frac{z_3}{z_4^2} z_1^2 z_2 + z_5^2 z_1 \\ \dot{z}_3 = 0 \\ \dot{z}_4 = 0 \\ \dot{z}_5 = 0 \end{cases} \quad (4.39)$$

En posant le vecteur étendu  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \gamma_0, x_0, \omega)^T$ , l'équation d'observation devient :

$$y(t) = \mathbf{h}(\mathbf{z}, t) + \nu(t) \quad (4.40)$$

$h$  est donc la fonction reliant l'état à la mesure.

On notera  $g$  la fonction de passage de  $z$  à  $\dot{z}$ . Pour ce système non linéaire, l'observateur peut être défini par :

$$\dot{\hat{z}} = g(\hat{z}, t, F(t)) + K(t)(y(t) - h(\hat{z}, t)) \quad (4.41)$$

Où  $K(t) \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$  est la matrice de gain de Kalman variante dans le temps.

Nous utilisons un observateur linéaire basée sur l'EKBF avec un degré de stabilité prescrit. Comme proposée dans [Reif et al., 1998], cette légère modification de l'EKBF permet d'ajuster la dynamique avec comme objectif d'incrémenter le domaine d'attraction et de réduire le temps décroissement de l'erreur. Cette modification utilise l'équation différentielle de Ricatti modifiée [Grewal and Andrews, 2001] de la forme suivante :

$$\dot{P} = (J_g + \alpha I)P + P(J_g^T + \alpha I) - KJ_h P + Q \quad (4.42)$$

Dans cette équation,  $\alpha$  est un réel positif,  $Q \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$  est la matrice de covariance du bruit du procédé,  $P \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$  est la matrice de covariance de l'erreur et les matrices  $J_g \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$  et  $J_h \in \mathbb{R}^{1 \times 5}$  sont les matrices Jacobiennes respectivement des fonctions  $g$  et  $h$  associées à l'estimation  $\hat{z}$ . Le gain de l'observateur est défini de la même forme que pour le filtre de Kalman étendu :

$$K(t) = P(t)J_h^T(t)R^{-1} \quad (4.43)$$

$R$  définit la matrice de covariance du bruit de mesure.

### 3.2.2 Approche par changement de variable

Une autre possibilité pour la linéarisation du modèle de Van der Pol, est de transformer la représentation en effectuant un changement de variable, à partir de la méthode décrite dans [Besancon et al., 2010] :

$$\bar{z}_2 = z_2 - \gamma_0 z_1 + \frac{\gamma_0}{x_0^2} \frac{z_1^3}{3} \quad (4.44)$$

A partir de (4.33), le système est défini dans l'espace d'état par :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 &= \bar{z}_2 + \gamma_0 z_1 - \frac{\gamma_0}{x_0^2} \frac{z_1^3}{3} \\ \dot{z}_2 &= (\gamma_0 - \frac{\gamma_0}{x_0^2} z_1^2) z_2 - \omega^2 z_1 - (\gamma_0 - \frac{\gamma_0}{x_0^2} z_1^2) z_2 \\ &= -\omega^2 z_1 \\ y &= z_1 \end{cases} \quad (4.45)$$

En posant le vecteur d'état :

$$\zeta = (z_1, \bar{z}_2, \gamma_0, \frac{\gamma_0}{x_0^2}, \omega^2)^T \quad (4.46)$$

le système linéaire devient :

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = \mathbf{A}(y)\zeta \\ y = \mathbf{C}\zeta \end{cases} \quad (4.47)$$

où les matrices  $\mathbf{A}(y)$  et  $\mathbf{C}$  sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & z_1 & -\frac{z_1^3}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \zeta \\ y &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \zeta \end{aligned} \quad (4.48)$$

L'observation du système peut alors être réalisée en utilisant les matrices  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{C}$  dans (4.42) à la place des Jacobiennes des fonctions  $g$  et  $h$ . Cette modification réduit considérablement les besoins en calcul, en particulier lorsque la dimension du système augmente.

### 3.2.3 Simulations et résultats

Pour les simulations de l'équation de Van der Pol présentées dans cette section, nous utilisons le groupe de paramètres suivant :

$$\gamma = 0.5, \omega = 3, x_0 = 4.5 \quad (4.49)$$

Ces simulations ont été réalisées en utilisant Matlab Simulink.

#### 3.2.3.1 EKF classique : cas sans bruit

Avant de débiter l'estimation avec un filtre de Kalman, nous devons spécifier ses conditions initiales. Pour un système linéarisé en utilisant les matrices Jacobiennes, les conditions initiales des états estimés sont :

$$\hat{\mathbf{z}}(0) = (0, 0, 5, 10, 7)^T \quad (4.50)$$

La valeur initiale de la matrice de covariance est établie à  $\mathbf{P}(0) = \mathbf{I}_{[5 \times 5]}$ , la covariance du bruit de mesure à  $\mathbf{R} = 1$  et la covariance du bruit du procédé à  $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{[5 \times 5]}$ .

L'utilisation de l'équation différentielle de Ricatti modifiée (4.42) présentée dans [Reif et al., 1998], nous permet de réduire de façon significative le temps de convergence  $t_c$ . Nous avons observé comment, dans

le cas de Van der Pol, le temps de convergence  $t_c$  est réduit en fonction de la valeur de  $\alpha$  choisie pour les conditions initiales données par (4.50).

Dans les Figures 4.12, 4.13 et 4.14, nous observons l'estimation des paramètres de l'équation de Van der Pol pour deux valeurs différentes de  $\alpha$ .

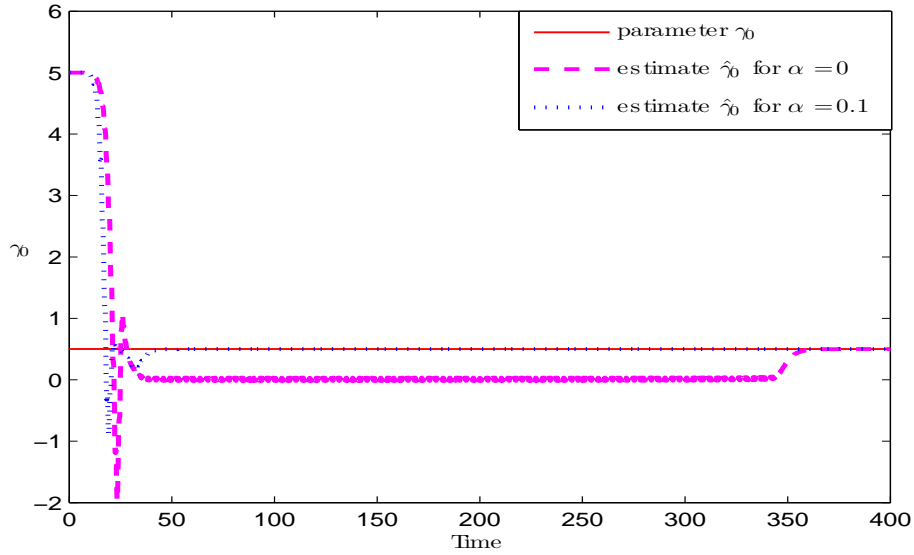


FIGURE 4.12 – Estimation de  $\gamma_0$  pour des valeurs de  $\alpha = 0$  et  $\alpha = 0.1$  dans l'équation modifiée de Riccati (4.42)

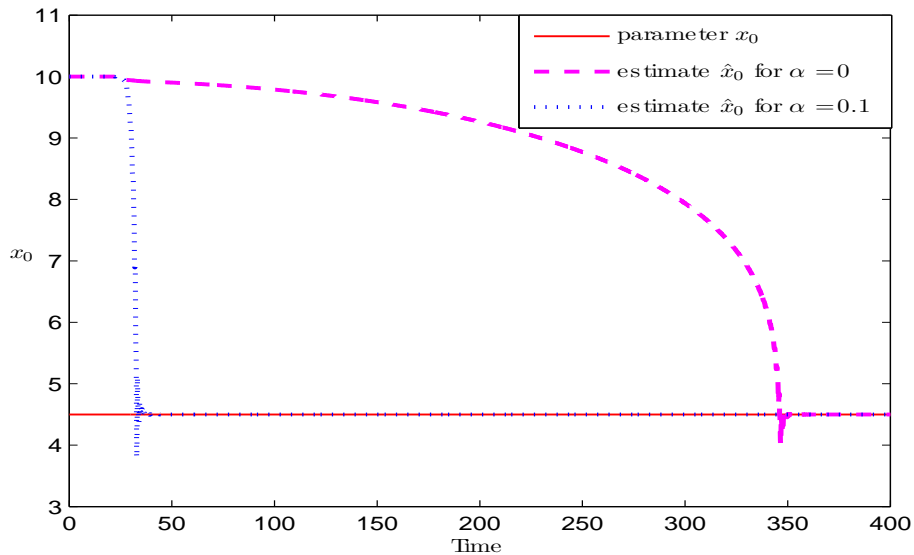


FIGURE 4.13 – Estimation de  $\omega$  pour des valeurs de  $\alpha = 0$  et  $\alpha = 0.1$  dans l'équation modifiée de Riccati (4.42)

Quand  $\alpha = 0$ , c'est à dire pour l'équation différentielle normale de Riccati, le temps de convergence pour l'estimation de  $\gamma_0$ ,  $\omega$  et  $x_0$  est  $t_c = 360s$ . En comparaison, pour une valeur de  $\alpha = 0.1$  nous pouvons observer la réduction du temps de convergence à  $t_c = 45s$ .

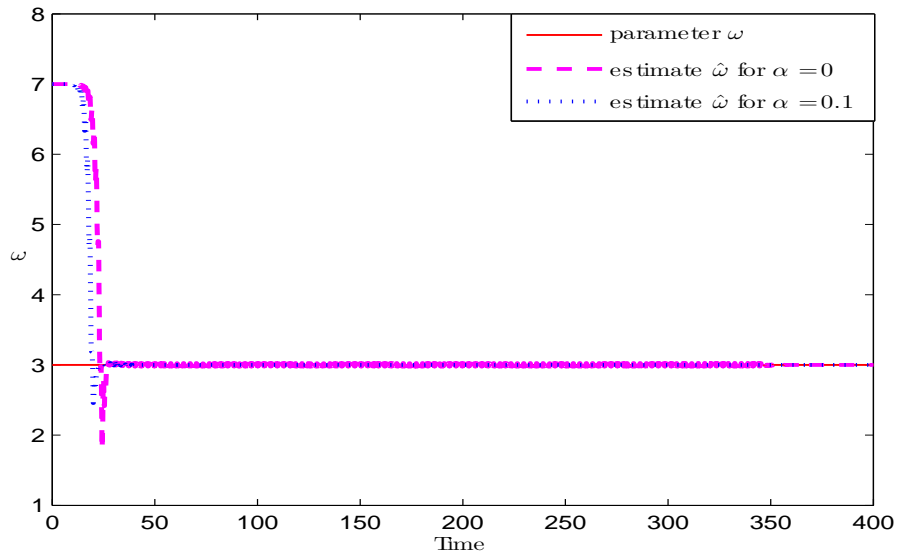


FIGURE 4.14 – Estimation de  $x_0$  pour des valeurs de  $\alpha = 0$  et  $\alpha = 0.1$  dans l'équation modifiée de Riccati (4.42)

A partir de ces résultats, nous avons choisi de conserver une valeur de  $\alpha$  à 0.1 pour les prochaines estimations.

Si nous incrémentons les conditions initiales données par (4.50), nous observons qu'en modifiant seulement une valeur à la fois, par exemple  $\hat{z}_1$ , et en gardant les autres conditions aux mêmes valeurs, l'estimation converge jusqu'à la valeur de  $\hat{z}_1 = 3$ . Pour des valeurs supérieures, l'estimation diverge.

Les Figures 4.15, 4.16 et 4.17 nous montrent que le système diverge pour  $P(0) = I$  avec les conditions initiales  $\hat{z}(0) = (4, 0, 5, 10, 7)^T$  c'est à dire lorsque nous incrémentons  $\hat{z}_1$ .

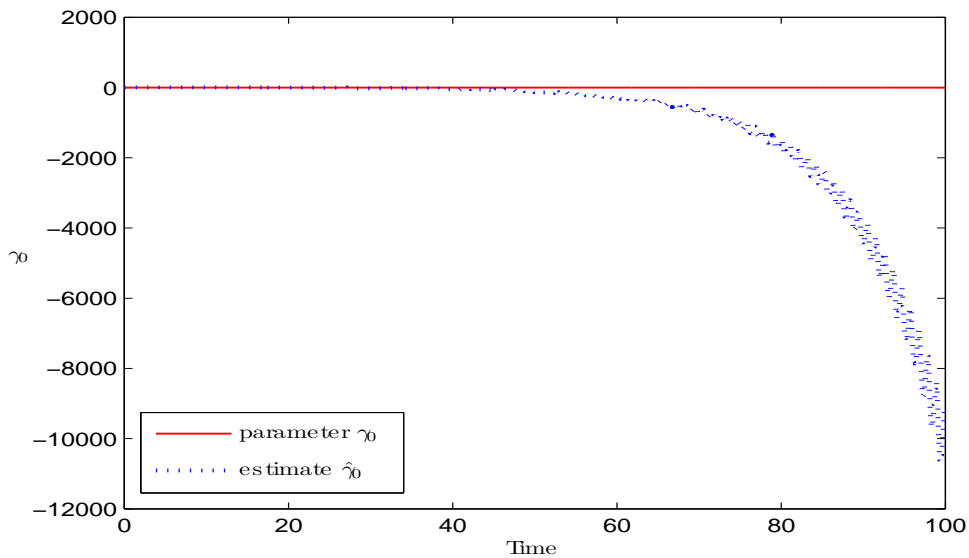


FIGURE 4.15 – Exemple de divergence de l'estimation de  $\gamma_0$  lorsque nous modifions les conditions initiales

Nous avons réalisé cette procédure pour tester les autres conditions initiales et nous avons observé les

valeurs limites que chaque condition initiale peut atteindre avant que son estimation diverge. Nous avons obtenu :  $\hat{z}_2(0) = 8$ ,  $\hat{z}_3(0) = 12$ ,  $\hat{z}_4(0) = 7$  and  $\hat{z}_5(0) = 13$ .

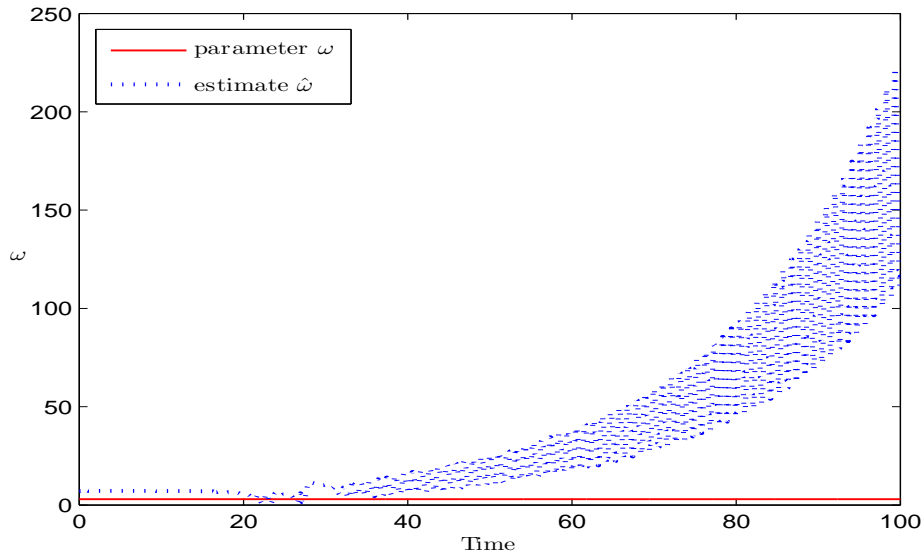


FIGURE 4.16 – Exemple de divergence de l'estimation de  $\omega$  lorsque nous modifions les conditions initiales

Nous avons également observé que le système est sensible aux conditions initiales de  $\hat{\mathbf{z}}$  et aux valeurs de la matrice  $\mathbf{P}(0)$ . En incrémentant les conditions initiales avec des valeurs différentes de  $z_1$  et  $z_2$  à celles de (4.50) :

$$\hat{\mathbf{z}}(0) = (20, 10, 5, 10, 7)^T \quad (4.51)$$

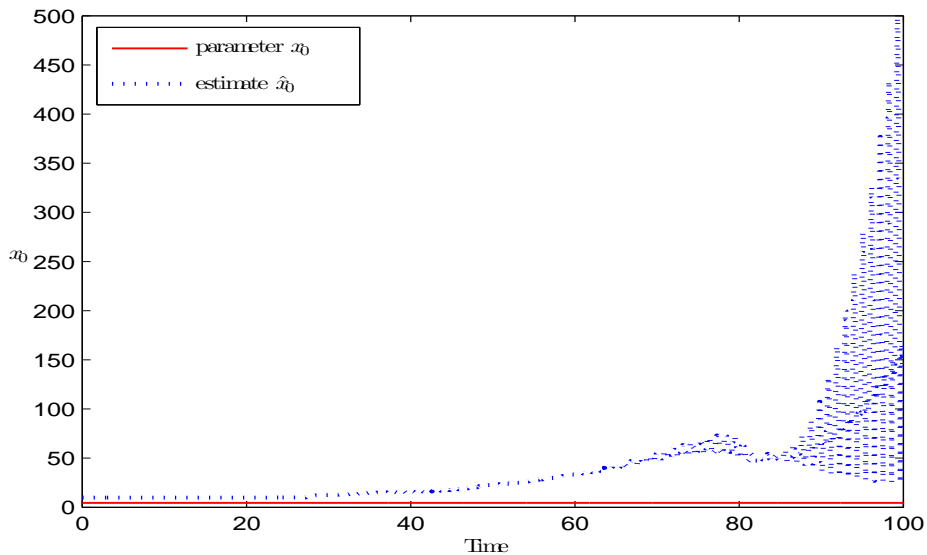


FIGURE 4.17 – Exemple de divergence de l'estimation de  $x_0$  lorsque nous modifions les conditions initiales

Les valeurs limites des conditions initiales de la matrice  $\mathbf{P}$  où les paramètres estimés convergent aux valeurs simulées sont :

$$\mathbf{P}(0) = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^2 \ 10^2 \ 10^2) \quad (4.52)$$



Dans ce cas, le temps de convergence est  $t_c = 40s$ .

Si nous doublons les valeurs des conditions initiales de tous les paramètres donnés par 4.51 :

$$\hat{z}(0) = (40, 20, 10, 20, 14)^T \quad (4.53)$$

La valeur de  $P$  faisant converger l'estimation est :

$$\mathbf{P}(0) = \text{diag}(10^7 \ 10^7 \ 10^6 \ 10^6 \ 10^6) \quad (4.54)$$

Son temps de convergence pour l'estimation est de  $t_c = 35s$ .

Enfin, nous remarquons qu'en changeant les conditions initiales et en prenant des valeurs trop éloignées des valeurs simulées, il devient difficile d'initialiser  $\mathbf{P}(0)$  pour conserver la convergence de l'estimation.

### 3.2.3.2 EKBF classique : cas bruité

Comme nous l'avons décrit dans l'équation (4.34), pour le cas bruité, la sortie du système est  $y = z_1 + \nu$ . Dans ce cas,  $\nu$  est un bruit distribué uniformément et d'amplitude  $\pm 0.5$ , ce qui équivaut à environ 6% de l'amplitude de la sortie du modèle. Pour des valeurs initiales de  $\mathbf{R} = 1$  et de  $\alpha = 0.1$ , l'estimation ne converge pour les conditions initiales  $\hat{z}(0)$  et  $\mathbf{P}(0)$  données par 4.51 et 4.52. Nous augmentons alors la valeur de la covariance du bruit de mesure à  $\mathbf{R} = 8$ .

Les estimations obtenues sont montrées dans les Figures 4.18, 4.19 et 4.20.

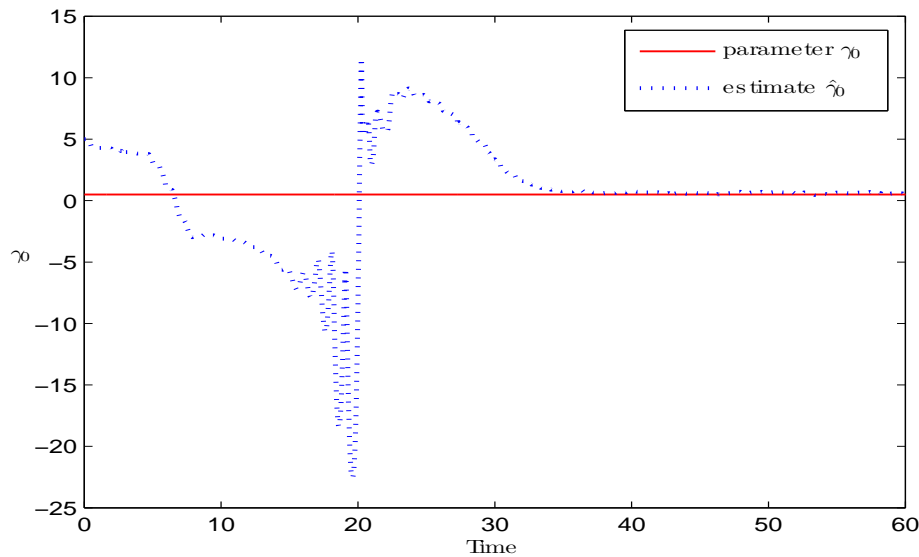


FIGURE 4.18 – Estimation de  $\gamma_0$  avec un filtre EKBF pour un cas bruité

Les estimations de  $\gamma$ ,  $\omega$  et  $x_0$  sont obtenues à partir des états  $z_3$ ,  $z_4$  et  $z_5$  en faisant la moyenne des valeurs de ces états quand l'estimation converge, par exemple pour  $t = [60; 100]s$ . Nous obtenons les valeurs  $\gamma = 0.4376$ ,  $\omega = 2.9960$  et  $x_0 = 4.5099$ .

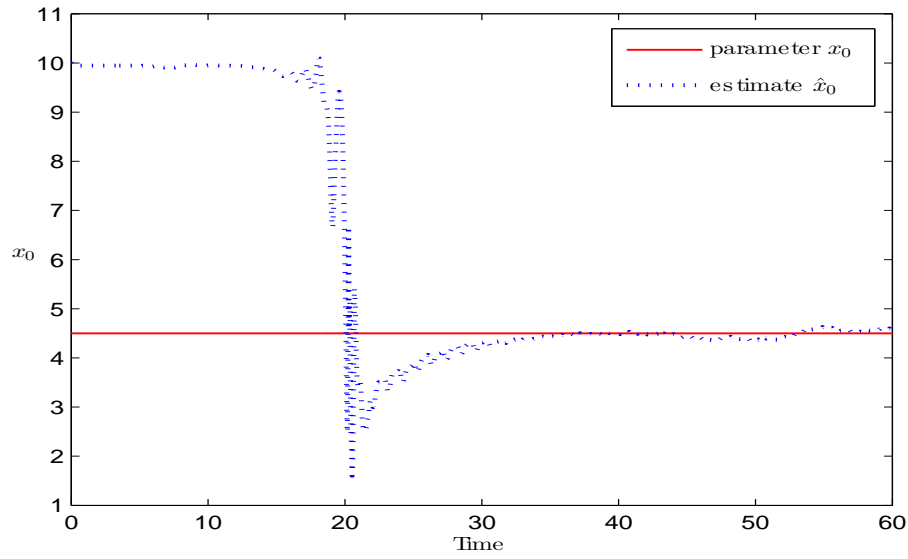


FIGURE 4.19 – Estimation de  $x_0$  avec un filtre EKBF pour un cas bruité

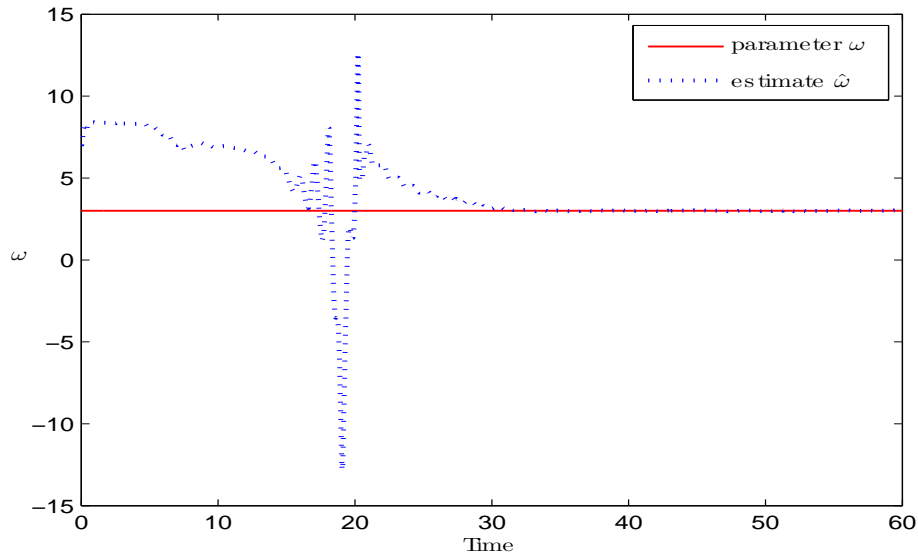


FIGURE 4.20 – Estimation de  $\omega$  avec un filtre EKBF pour un cas bruité

### 3.2.3.3 EKBF avec changement de variable : cas sans bruit

Les conditions initiales pour cette méthode sont données par  $\hat{z}(0) = (20, 10, 5, 0.05, 49)^T$ . La valeur initiale de la matrice de covariance est fixée à  $\mathbf{P}(0) = 10 * \mathbf{I}_{[5 \times 5]}$ , la covariance du bruit de mesure à  $\mathbf{R} = 8$  et la covariance du bruit du procédé à  $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{[5 \times 5]}$ .

Les estimations obtenues pour  $\gamma_0$ ,  $\omega$  et  $x_0$  sont montrées respectivement dans les Figures 4.21, 4.22, et 4.23. Nous observons que les estimations correspondent aux paramètres simulés, définis dans (4.49).

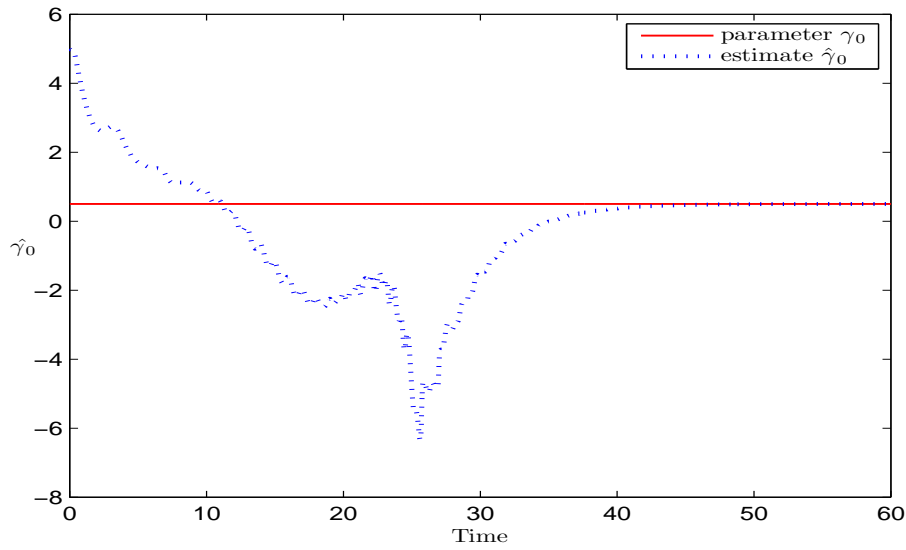


FIGURE 4.21 – Estimation de  $\gamma_0$  avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas sans bruit

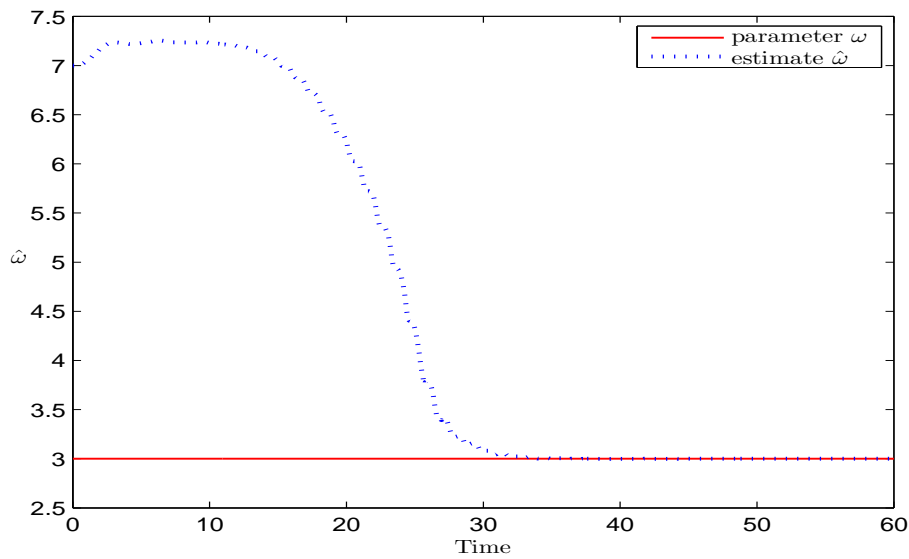


FIGURE 4.22 – Estimation de  $\omega$  avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas sans bruit

### 3.2.3.4 EKBF avec changement de variable : cas bruité

Le bruit  $\nu$  est un bruit uniforme d'amplitude  $\pm 0.5$  comme dans le cas de l'EKBF.  $x_0$  est obtenu en utilisant les valeurs moyennes de  $z_3$  et  $z_4$  quand l'estimation se stabilise, par exemple pour  $t = [60; 100]s$ . En effet, le paramètre  $x_0$  est au carré dans l'état  $z_3$ . Par conséquent,  $x_0$  est obtenu en divisant les valeurs moyennes de  $z_3$  et  $z_4$ . Les estimations obtenues sont  $\gamma_0 = 0.5223$ ,  $\omega = 3$  et  $x_0 = 4.5139$ , comme le montrent les Figures 4.24 et 4.25.

De plus, nous pouvons remarquer que cette méthode n'est pas sensible à  $P(0)$ .

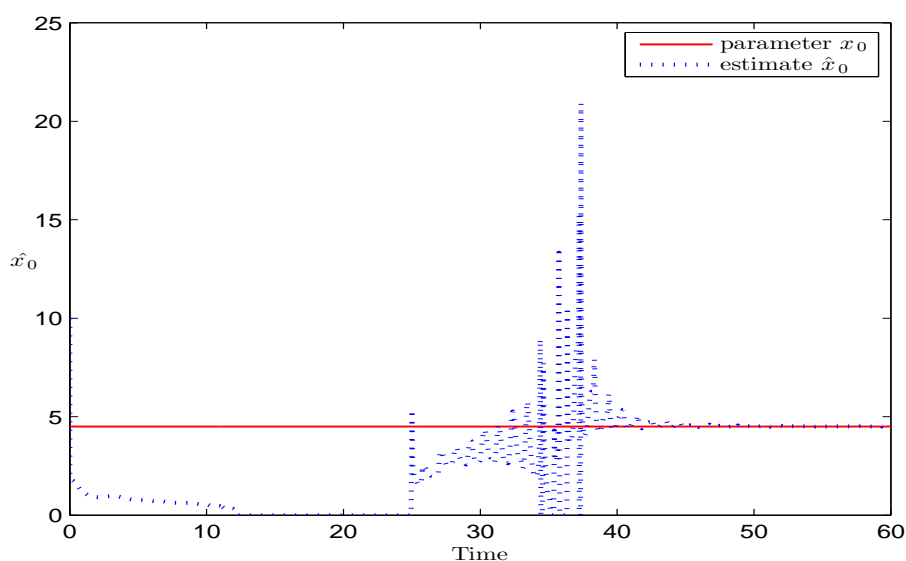


FIGURE 4.23 – Estimation de  $x_0$  avec un filtre EKF avec un changement de variable pour un cas sans bruit

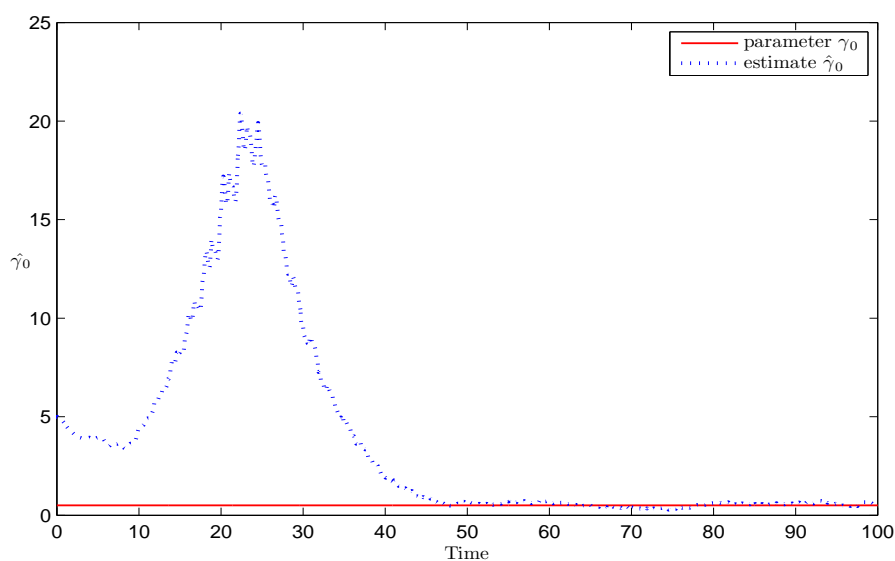


FIGURE 4.24 – Estimation de  $\gamma_0$  avec un filtre EKF avec un changement de variable pour un cas bruité

Dans le Tableau 4.5, nous montrons la comparaison des résultats obtenus pour l'estimation des paramètres en utilisant l'EKF classique et la méthode avec un changement de variable pour les cas bruités. Les estimations obtenues avec la méthode du changement de variable sont plus proches des paramètres estimés. De plus, cette méthode n'est pas sensible à  $P(0)$ . Elle sera donc utilisée pour l'estimation des paramètres du modèle de Van der Pol.

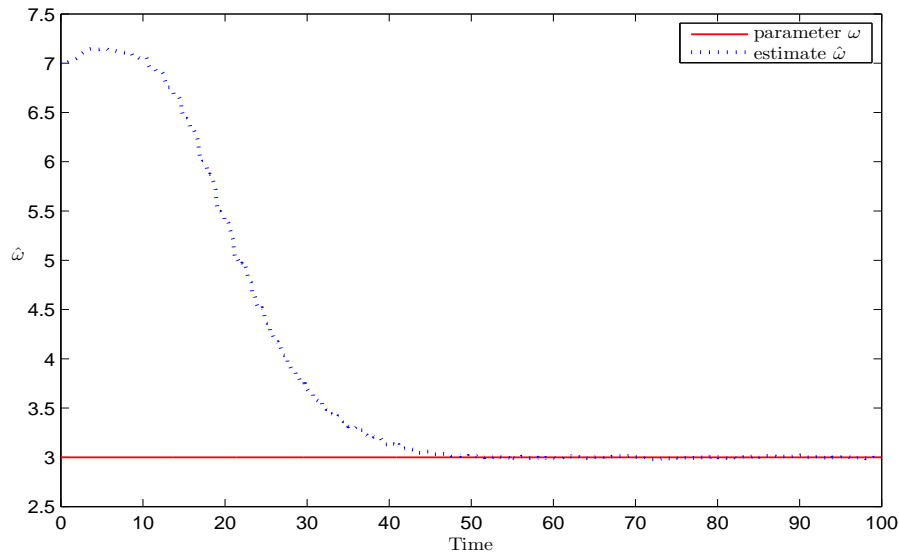


FIGURE 4.25 – Estimation de  $\omega$  avec un filtre EKBF avec un changement de variable pour un cas bruité

TABLEAU 4.5 – Paramètres estimés pour l'EKBF et la méthode de changement de variable pour un cas bruité

Paramètre	$v$	$\hat{v}$ EKBF	$\hat{v}$ Changement de variable
$\gamma_0$	0.5	0.4376	0.5223
$x_0$	4.5	4.5099	4.5139
$\omega$	3	2.9960	3

## 4 Description et validation des méthodes pour l'identification des paramètres du modèle des oscillations auto-entretenues

Nous décrivons dans cette section, l'identification des paramètres du modèle auto-entretenu par la méthode des moindres carrés, comme défini dans la Section 3.1 pour le cas du modèle de Van der Pol.

Afin de définir le vecteur des mesures  $\Phi$  et le vecteur des paramètres  $\theta$ , nous devons identifier les paramètres connus et les paramètres inconnus du modèle.

Nous considérons le modèle général pour l'analyse décrit par l'équation (4.15). Lorsque ce modèle sera utilisé pour l'analyse du système couplé homme-système haptique, nous considérerons connus les paramètres suivants :

- Les paramètres de l'objet virtuel passif  $K_{OV}$  et  $B_{OV}$ . Ils sont fixés lors de l'implantation du modèle sur la plateforme temps réel.
- Les paramètres de la fonction non linéaire  $F_0$  et  $V_0$ . Ils sont également fixés lors de l'implantation sur la plateforme temps réel.

Les paramètres inconnus à identifier sont alors :

- Les paramètres du TGR : la masse  $m_{TGR}$  et la viscosité  $b_{TGR}$ .
- Les paramètres de l'homme : la masse  $m_H$ , la viscosité  $b_H$  et la raideur  $k_H$

A partir de l'équation (4.15), nous définissons des paramètres généraux :

$$\begin{aligned} m &= (m_{TGR} + m_H) \\ b &= (b_{TGR} + b_H + B_{OV}) \\ k &= (k_H + K_{OV}) \end{aligned} \quad (4.55)$$

Nous obtenons alors une équation générale de la forme :

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx - F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{V_0}\right)^2} = 0 \quad (4.56)$$

Cette équation peut être exprimée comme une régression linéaire :

$$x = -\frac{m}{k}\ddot{x} - \frac{b}{k}\dot{x} + \frac{F_0}{k} \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{V_0}\right)^2} \quad (4.57)$$

Nous considérons la sortie du modèle suivante :

$$y_0 = x \quad (4.58)$$

Dans le cas où une perturbation, par exemple un bruit  $\nu$ , est présente dans la sortie du système, la variable observée et considérée est :

$$y = y_0 + \nu = x + \nu \quad (4.59)$$

Le vecteur des mesures  $\phi(t)$  et le vecteur des paramètres  $\theta$  sont alors définis par :

$$\phi(t) = \left( \ddot{x}, \dot{x}, F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{V_0}\right)^2} \right) \quad (4.60)$$

$$\theta = \left( -\frac{m}{k}, -\frac{b}{k}, \frac{1}{k} \right) \quad (4.61)$$

En développant les paramètres généraux de l'équation (4.55), nous obtenons :

$$\theta(t) = \left( -\frac{(m_{TGR} + m_H)}{(k_H + K_{OV})}, -\frac{(b_{TGR} + b_H + B_{OV})}{(k_H + K_{OV})}, \frac{1}{(k_H + K_{OV})} \right) \quad (4.62)$$

La méthode des moindres carrés pour l'identification des paramètres peut être utilisée comme décrite précédemment. Nous pouvons également modifier le vecteur des paramètres  $\theta$  et le vecteur des mesures  $\Phi(t)$  si nous souhaitons considérer d'autres paramètres comme inconnus.

## 4.1 Estimation des paramètres du modèle virtuel

### 4.1.1 Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas sans bruit

Pour effectuer une première validation de la méthode, nous allons identifier les paramètres du modèle virtuel passif ainsi que les paramètres du TGR qui oscille lorsque ce modèle est implanté sur le simulateur, sans être couplé à l'homme. Nous considérons donc, le modèle décrit par (4.12).

Dans ce cas, le vecteur des mesures est défini comme décrit dans l'équation (4.60). A partir de (4.62), le vecteur des paramètres à identifier est alors donné par :

$$\theta(t) = \left( -\frac{m_{TGR}}{K_{OV}}, -\frac{(b_{TGR} + B_{OV})}{K_{OV}}, \frac{1}{K_{OV}} \right) \quad (4.63)$$

Nous considérons tous les paramètres du vecteur  $\theta$  (4.63) inconnus et la viscosité  $b_{TGR}$  du TGR négligeable.

Les paramètres utilisés pour la simulation sont définis dans le Tableau 4.6. La masse est considérée à une valeur de 0.340 Kg correspondant au poids environ du complexe touche-tranche du TGR. Pour les paramètres de l'objet virtuel, nous considérons un groupe de paramètres quelconque provoquant des oscillations.

Paramètre	Valeur Simulée	Unités
$m$	0.340	Kg
$B_{OV}$	9.2208	Ns <sup>2</sup> /m
$K_{OV}$	922.0770	N/m
$F_0$	2.1016	N
$v_0$	0.0080	m/s <sup>2</sup>

TABLEAU 4.6 – Paramètres du modèle utilisé pour la simulation Matlab

Les simulations du modèle sont effectuées en utilisant l'outil MATLAB/Simulink.

Dans un premier cas, nous récupérons les signaux de position  $x_s$ , de vitesse  $\dot{x}_s$  et d'accélération  $\ddot{x}_s$ , à partir de la simulation MATLAB du modèle décrit par (4.12). Ce modèle est similaire à celui montré dans la Figure 4.31 à la différence qu'aucun bruit n'est ajouté en sortie. Ces signaux sont montrés respectivement dans les Figures 4.26, 4.27 et 4.28. Dans la Figure 4.26, nous observons le signal de position montrant le comportement auto-oscillant du modèle.

Les signaux obtenus lors de la simulation sont utilisés pour construire le vecteur des mesures  $\phi(t)$  (4.60) servant à identifier le vecteur des paramètres  $\theta$  (4.63) par la méthode des moindres carrés.

Dans ce premier cas sans bruit ni perturbations externes, les paramètres identifiés sont, comme attendus, les mêmes que les paramètres simulés. Ces résultats représentent une première validation de la méthode proposée.

Nous considérons un deuxième cas, dans lequel nous récupérons seulement la position  $x_s$  de la simulation et nous trouvons la vitesse  $\dot{x}_d$  et l'accélération  $\ddot{x}_d$  par dérivation en utilisant la méthode de la différence centrale décrite dans la Section 3.1.2.1. Cette méthode se rapproche plus du cas réel où nous calculerons la vitesse et l'accélération à partir des données de position.

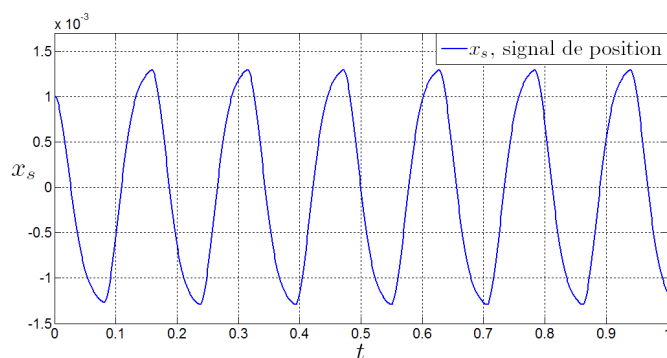


FIGURE 4.26 – Signal de position obtenu lors de la simulation MATLAB/Simulink pour les paramètres définis dans le Tableau 4.6

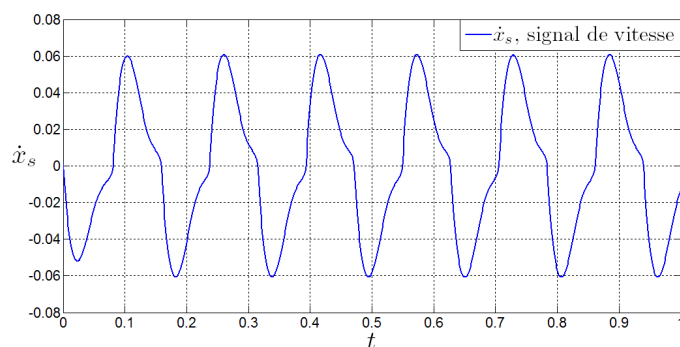


FIGURE 4.27 – Signal de vitesse obtenu lors de la simulation MATLAB/Simulink pour les paramètres définis dans le Tableau 4.6

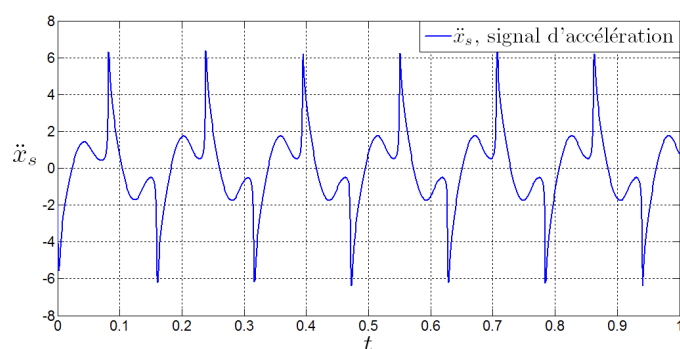


FIGURE 4.28 – Signal d'accélération obtenu lors de la simulation MATLAB/Simulink pour les paramètres définis dans le Tableau 4.6

La vitesse  $\dot{x}_d$  et l'accélération  $\ddot{x}_d$  calculées en dérivant  $x_s$  sont montrées respectivement dans les Figures 4.29 et 4.30. Elles sont comparées avec les signaux de vitesse  $\dot{x}_s$  et d'accélération  $\ddot{x}_s$  issus de la simulation.



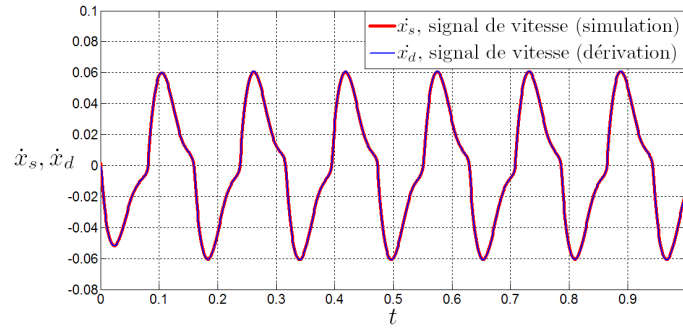


FIGURE 4.29 – Signal de vitesse  $\dot{x}_d$  calculé par dérivation à partir de la position  $x_s$ , comparé avec le signal de vitesse  $\dot{x}_s$  issu de la simulation.

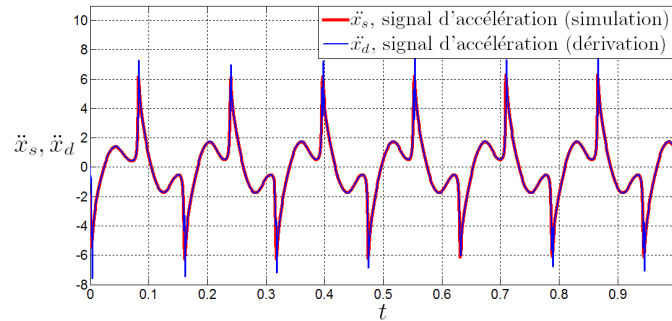


FIGURE 4.30 – Signal d'accélération  $\ddot{x}_d$  calculé par dérivation à partir de la position  $x_s$ , comparé avec le signal d'accélération  $\ddot{x}_s$  issu de la simulation.

Le vecteur des mesures  $\phi$  est alors construit en utilisant les données de position  $x_s$ , ainsi que la vitesse  $\dot{x}_d$  et l'accélération  $\ddot{x}_d$  calculées par dérivation. Les résultats de l'identification des paramètres, pour une simulation réalisée avec un pas d'échantillonnage de  $T_e = 0.001$ , sont montrés dans le Tableau 4.7.

Paramètre	$p$ simulé	$\hat{p}$ identifié	%Er
$m$	0.340	0.3567	2.7918
$B_{OV}$	9.2208	9.1546	0.7172
$K_{OV}$	922.0770	946.4109	2.6390

TABLEAU 4.7 – Paramètres simulés et paramètres identifiés dans le cas où la position est obtenue par simulation et la vitesse et l'accélération par dérivation

Nous observons que les paramètres estimés sont très proches des paramètres simulés, avec des erreurs relatives inférieures à 3%. Cependant, nous observons que si nous diminuons le pas de simulation, par exemple à  $T_e = 0.0001$ , les paramètres estimés se rapprochent encore plus des paramètres simulés et les erreurs relatives sont inférieures à 0.01%. Dans le cas de l'identification avec des données réelles, nous utiliserons donc une fréquence d'échantillonnage élevée de  $10kHz$ , permettant d'effectuer des calculs plus précis des dérivées.

#### 4.1.2 Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas bruité

Nous analysons un troisième cas, dans lequel un bruit est ajouté à la sortie du système  $x_s$  (Figure 4.31). Il s'agit d'un bruit blanc, comme dans le cas de l'identification pour le modèle de Van der Pol. Nous considérons le cas où la puissance du signal est environ vingt fois supérieure à la puissance du bruit, donc un  $SNR = 12.8235$ . Nous obtenons ainsi une variable bruitée  $x_b$ , que nous filtrons pour calculer ses dérivées, c'est à dire sa vitesse  $\dot{x}_d$  et son accélération  $\ddot{x}_d$ , en utilisant la méthode de la différence centrale décrite dans la Section 3.1.2.1.

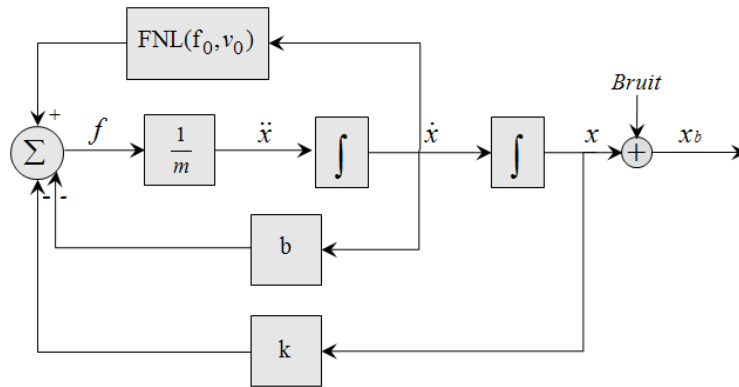


FIGURE 4.31 – Modèle du système avec les paramètres généraux et ajout de bruit en sortie

Nous choisissons d'analyser ce cas, puisque la même méthode sera utilisée pour construire le vecteur des mesures  $\phi$  lors de l'identification des paramètres à partir des données réelles.

Afin de contrôler le SNR du signal de position ainsi que de ses dérivées, nous filtrons le signal bruité  $x_b$ , avant la dérivation. Nous utilisons comme dans le cas du modèle de Van der Pol, un filtre numérique non causal de phase zéro, un filtre de Butterworth aller-retour, passe-bas d'ordre 2, comme décrit dans la Section 3.1.2.3.

Le signal de position bruité  $x_b$  ainsi que le signal filtré correspondant  $x_f$  sont montrés dans la Figure 4.32. La vitesse  $\dot{x}_d$  et l'accélération  $\ddot{x}_d$  sont calculées en dérivant le signal de position filtré  $x_f$ . Ces courbes de vitesse et d'accélération obtenues par dérivation sont affichées respectivement dans les Figures 4.33 et 4.34.

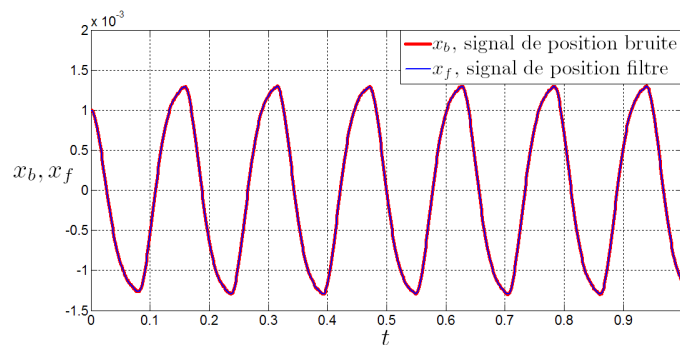
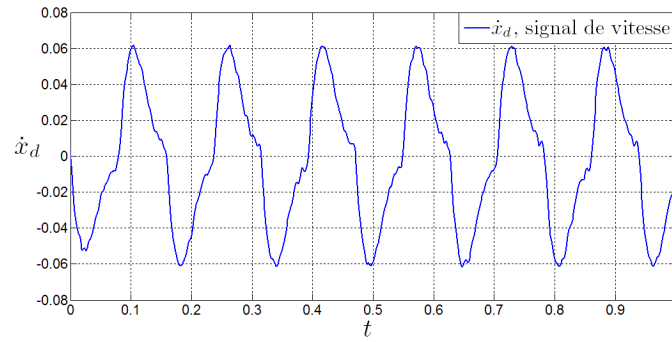
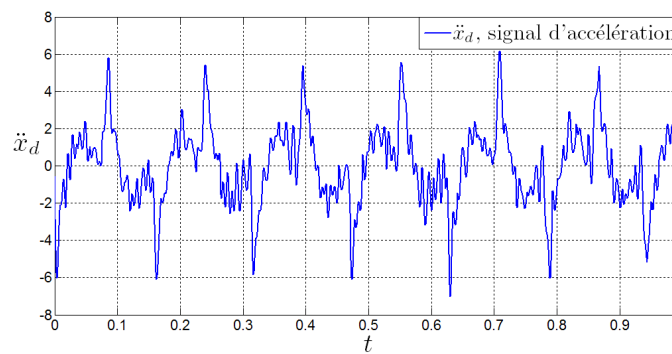


FIGURE 4.32 – Signal de position bruité  $x_b$  et son signal filtré  $x_f$

FIGURE 4.33 – Vitesse  $\dot{x}_d$  calculée par dérivation à partir du signal de position filtré  $x_f$ FIGURE 4.34 – Accélération  $\ddot{x}_d$  calculée par dérivation à partir du signal de position filtré  $x_f$ 

Le vecteur des mesures  $\phi$  est alors construit à partir du signal de position filtré  $x_f$ , et de ses dérivées, la vitesse  $\dot{x}_d$  et l'accélération  $\ddot{x}_d$ .

Les résultats d'identification obtenus sont montrés dans le Tableau 4.8. Nous observons les erreurs relatives allant jusqu'à 2.33%. Ces erreurs restent faibles pour un cas d'identification de paramètres à partir d'une mesure bruitée. Cette méthode pourra alors être utilisée pour l'identification des paramètres à partir des données réelles lors des expériences décrites dans le Chapitre 6. Il suffira de modifier le vecteur des paramètres  $\theta$  en fonction des paramètres considérés inconnus.

Paramètre	$p$ simulé	$\hat{p}$ identifié	%Er
$m$	0.340	0.3363	1.07
$B_{OV}$	9.2208	9.2243	0.04
$K_{OV}$	922.0770	943.5378	2.33

TABLEAU 4.8 – Paramètres simulés et paramètres identifiés du modèle virtuel pour le cas bruité

## 4.2 Estimation des paramètres de l'homme

### 4.2.1 Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas sans bruit

Nous considérons maintenant le cas où les paramètres du modèle virtuel sont connus et nous voulons estimer les paramètres de l'homme : sa masse  $m_H$ , sa viscosité  $b_H$  et sa raideur  $k_H$ .

La méthode à suivre est la même que dans le cas précédent. Le vecteur des mesures  $\phi(t)$  est défini par (4.60) et le vecteur des paramètres  $\theta$  est défini par (4.61).

Nous définissons les paramètres de l'homme comme montré dans le Tableau 4.9.

Paramètre	Valeur Simulée	Unités
$m_H$	0.200	$Kg$
$b_H$	10	$Ns^2/m$
$k_H$	200	$N/m$

TABLEAU 4.9 – Paramètres de l'homme utilisés pour la simulation Matlab

Les autres paramètres du modèle sont considérés avec les mêmes valeurs que dans le Tableau 4.6. Les paramètres généraux définis par (4.55), sont alors montrés dans le Tableau 4.10.

Paramètre	Valeur Simulée	Unités
$m$	0.540	$Kg$
$b$	19.2208	$Ns^2/m$
$k$	1122.0770	$N/m$

TABLEAU 4.10 – Paramètres généraux utilisés pour la simulation Matlab

Comme dans l'estimation des paramètres du modèle virtuel, nous considérons un cas sans bruit. Dans un premier temps, le vecteur des mesures  $\phi$  est calculé à partir des signaux récupérés lors de la simulation Matlab. Les paramètres estimés sont les mêmes que les paramètres simulés. Dans un second temps, la vitesse et l'accélération sont calculées en dérivant la position. Nous obtenons également des estimations égales aux paramètres simulés.

#### 4.2.2 Simulation et résultats pour le modèle auto-entretenu en utilisant la méthode des moindres carrés : cas bruité

Nous considérons, ensuite, le cas où un bruit est ajouté au système, avec un  $SNR = 19.7701dB$ . Nous filtrons le signal de position bruité  $x_b$  et nous dérivons ce signal filtré pour calculer la vitesse  $\dot{x}_d$  et l'accélération  $\ddot{x}_d$ . Ces signaux sont utilisés pour construire le vecteur de mesures  $\phi$ .

Les résultats de cette estimation sont montrés dans le Tableau 4.11.

Paramètre	$p$ simulé	$\hat{p}$ identifié	%Er
$m$	0.540	0.5338	1.14
$b$	19.2208	19.3405	0.63
$k$	1122.0770	1153.84	2.83

TABLEAU 4.11 – Paramètres généraux simulés et estimés pour le cas bruité

Nous observons que les erreurs relatives sont faibles, inférieures à 2.83%. Cette méthode sera donc celle que nous utiliserons pour l'identification des paramètres avec des données réelles.

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux modèles pouvant représenter l'interaction dans le cas des mouvements périodiques : un modèle basé sur l'équation de Van der Pol et un modèle d'oscillations auto-entretenues. Nous supposons que l'interaction homme-système haptique lors de l'exécution d'une tâche périodique peut être décrite par ces modèles.

Dans le cas du modèle de Van der Pol, nous considérons que lorsque l'homme manipule un objet passif sur le simulateur haptique, ses mouvements peuvent être décrits par cette équation.

Dans le cas du modèle des oscillations auto-entretenues, un objet virtuel actif est implanté sur la plateforme temps réel afin de provoquer des oscillations auto-entretenues à la touche du dispositif haptique et est utilisé pour l'analyse du geste passif de l'homme dans le Chapitre 6.

Nous avons également proposé des méthodes pour l'estimation des paramètres de ces modèles. Pour le modèle de Van der Pol, nous avons estimé les paramètres du modèle à partir des données obtenues lors de la simulation en utilisant la méthode des moindres carrés, le filtre de Kalman-Bucy étendu classique ainsi que le filtre de Kalman-Bucy étendu avec un changement de variable. Malgré sa non linéarité, le modèle de Van der Pol peut être représenté par une équation linéaire par rapport à ses paramètres, permettant l'utilisation de la méthode des moindres carrés. Comme attendu dans le cas sans bruit, les paramètres identifiés sont les mêmes que ceux simulés avec les trois méthodes car le modèle simulé et le modèle identifié sont les mêmes. Pour la méthode des moindres carrés bruitée, nous avons considéré le cas où le vecteur des mesures est construit à partir des données issues de la simulation. Nous avons également considéré le cas où nous récupérons seulement les données de position et la vitesse et l'accélération sont calculées par dérivation de cette position. Nous avons observé que dans les deux cas, les résultats dépendent du filtre utilisé. Cependant, les résultats des estimations sont bons lorsque le SNR est élevé. Pour ce modèle, nous avons également réalisé une estimation des paramètres en utilisant la méthode du filtre de Kalman-Bucy étendu classique en la comparant avec la même méthode en utilisant un changement de variable. Nous avons observé que la méthode classique est sensible aux conditions initiales de  $\mathbf{P}(0)$  tandis que la deuxième ne l'est pas. Toutes les méthodes ont été validées et peuvent être utilisées pour l'identification des paramètres à partir des données réelles.

Dans le cas du modèle des oscillations auto-entretenues, nous avons analysé l'identification des paramètres en utilisant la méthode des moindres carrés. Ce modèle peut être représenté par une équation linéaire par rapport à ses paramètres ce qui permet l'utilisation de cette méthode. Nous avons analysé l'estimation des paramètres de l'objet virtuel ainsi que l'estimation des paramètres généraux, incluant les paramètres de l'homme. Dans le cas sans bruit, lorsque le vecteur des mesures est construit à partir des signaux issus de la simulation, les paramètres estimés correspondent bien aux paramètres simulés. Nous avons également considéré le cas où la position est récupérée à partir de la simulation et la vitesse et l'accélération sont obtenues par dérivation de cette position. Dans ce cas, lorsque le pas de simulations est suffisamment faible, les paramètres estimés restent très proches des paramètres simulés avec des erreurs relatives inférieures à 0.01%. Nous avons analysé un dernier cas similaire au précédent mais avec un bruit ajouté au signal de position. Dans ce cas, un filtre passe bas est utilisé pour filtrer le signal avant la dérivation de la position afin de contrôler le SNR. Nous avons observé comme dans le cas du modèle de Van der Pol que les résultats obtenus pour la méthode des moindres carrés dépendent du filtre utilisé. Cependant, les résultats d'estimation obtenus par les deux analyses sont proches des paramètres simulés avec des erreurs relatives inférieures à 3%. Cette méthode a été validée et peut être utilisée pour l'identification des paramètres à partir des données réelles.

Dans le cadre de cette thèse, l'analyse des méthodes d'identification des oscillateurs proposés est importante pour la caractérisation des modèles du couplage. Dans un contexte général, les oscillateurs

représentent un intérêt scientifique incontestable et ses méthodes d'identification peuvent être utilisées dans de multiples applications des oscillateurs, comme l'analyse des mouvements et de la locomotion.

Les méthodes analysées sont utilisées pour identifier les paramètres à partir des mesures de l'amplitude des oscillations. Cependant, nous pouvons utiliser n'importe quelle autre mesure selon les dispositions techniques de l'expérience implémentée. Pour l'identification des paramètres à partir des données réelles issues des expériences dans des situations d'interaction haptique décrites dans le Chapitre 6, nous utiliserons la méthode des moindres carrés. Nous allons utiliser cette méthode d'identification pour caractériser les modèles présentés en utilisant des données issues des expériences de couplage dans des situations de simulation haptique. Deux situations seront analysées. Dans la première, un sujet manipule un objet virtuel à l'aide d'un dispositif haptique en exécutant un geste périodique. Cela nous permettra d'avoir des mesures réelles de l'amplitude  $x$  à partir desquelles nous caractériserons le modèle de Van der Pol. Dans la deuxième situation, le modèle des oscillations auto-entretenues est implanté sur le simulateur temps réel provoquant des oscillations de la touche du TGR. Dans ce cas, le sujet pose la main dessus et nous pouvons analyser les composantes passives du geste.

Ces expériences sont décrites dans le Chapitre 6 et seront implémentées en utilisant la plateforme de simulation haptique temps réel ERGON\_X conçue au laboratoire ICA/ACROE.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons le simulateur utilisé pour les expériences, son fonctionnement et ses caractéristiques. Nous présenterons également les travaux effectués sur ce simulateur afin de réaliser l'acquisition des données lors des expériences, ainsi que l'étalonnage et l'analyse effectués pour trouver les équivalences physiques de ses données acquises et des paramètres de simulation.



## Chapitre 5

# Mise en œuvre d'un dispositif pour l'analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>93</b>
<b>2</b>	<b>Plateforme temps réel ERGON_X</b>	<b>94</b>
2.1	Description du simulateur haptique	94
2.2	Échange de données entre le DSP et l'ordinateur hôte	103
<b>3</b>	<b>Mise en œuvre d'un protocole d'acquisition de données</b>	<b>106</b>
3.1	L'acquisition par DMA	107
3.2	L'acquisition par Buffer Circulaire	108
<b>4</b>	<b>Equivalence entre les paramètres du simulateur et les paramètres réels</b>	<b>111</b>
4.1	Relations entre l'environnement réel et l'environnement virtuel	111
4.2	Equivalence entre les paramètres réels et virtuels	116
4.3	Étalonnage Statique	122
4.4	Mesure du poids du complexe touche-tranche	126
4.5	Test de mesure de la raideur réelle	126
4.6	Test de fréquence	127
<b>5</b>	<b>Analyse du frottement sec</b>	<b>128</b>
<b>6</b>	<b>Définition d'un filtre dans le DSP</b>	<b>130</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>131</b>

---

## 1 Introduction

Nous proposons une étude du couplage en situation de simulation avec interaction haptique, c'est à dire le couplage entre l'homme et un objet virtuel lors de l'exécution d'une tâche via une interface haptique.



Pour l'analyse du couplage, nous allons effectuer des expériences impliquant l'acquisition de données du geste. Ces données peuvent être par exemple des données de position et des données de force issues du simulateur haptique lors de l'interaction. Dans ce chapitre, nous présentons la mise en œuvre du dispositif qui sera utilisé pour l'analyse expérimentale. Ce dispositif est composé d'une plateforme de simulation temps réel, appelée ERGON\_X et développée par l'ICA/ACROE. Nous ferons évoluer sa configuration initiale en lui apportant des améliorations notamment pour l'acquisition des données d'interaction.

Pour l'analyse de ses données, nous devons réaliser un étalonnage général du système pour valider les valeurs des paramètres utilisés et des grandeurs mesurées, c'est à dire qu'elles correspondent à des valeurs cohérentes en unités physiques. Cet étalonnage doit être réalisé afin d'établir une correspondance entre les grandeurs du monde réel en unités physiques et celles du monde virtuel en unités du simulateur.

Dans ce chapitre, nous réalisons une description du simulateur utilisé et des modifications que nous lui avons apportées. Nous présentons la mise en œuvre du protocole d'acquisition de données et nous traitons le problème d'équivalence entre les paramètres virtuels du simulateur et les paramètres physiques réels. Nous établissons un étalonnage nous permettant de résoudre ce problème qui n'a jamais été traité auparavant sur le simulateur utilisé.

## 2 Plateforme temps réel ERGON\_X

### 2.1 Description du simulateur haptique

#### 2.1.1 Les premières plateformes multisensorielles ICA/ACROE

Nous utilisons la plateforme temps réel de simulation haptique ERGON\_X, une architecture de simulation complètement synchrone conçue au laboratoire ICA/ACROE [Florens et al., 2004] [Couroussé, 2008].

Cette plateforme est le résultat de nombreuses années de recherches au sein du laboratoire ICA/ACROE et de l'évolution de plateformes conçues ces trente dernières années. Dès ses débuts, le développement des plateformes multisensorielles de l'ACROE/ICA a une étroite relation avec les outils de modélisation et de simulation physiques conçus pour la simulation interactive et le calcul en temps réel [Florens and Cadoz, 1990]. La première interface gestuelle conçue pour la simulation d'objets virtuels a vu le jour en 1978 [Florens, 1978]. Il s'agissait d'un système mono-axe capable de réaliser un déplacement horizontal de 40cm. Sa configuration est schématisée dans la Figure 5.1. Elle permettait l'utilisation de modèles simples mais fondamentaux comme des murs implantés sur un simulateur analogique. Celui-ci est basé sur un processeur LSI11 sur une machine PDP11 [Florens, 2008].

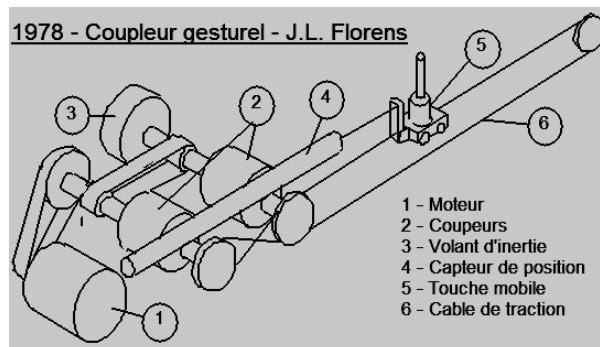


FIGURE 5.1 – Première interface gestuelle conçue pour la simulation d'objets virtuels, 1978 [Florens, 1978]

En 1981, un premier système multi-axes plus compact et plus précis, doté d'un actionneur électromagnétique à aimant mobile, d'un capteur de position et d'un processeur spécialisé CTR (Cordis Temps Réel) permettant une simulation synchrone à  $25,6\text{kHz}$  a été conçu [Couroussé, 2008]. Ce système, montré dans la Figure 5.2, est connu comme *La Touche*. Son nom fait référence à son aspect et à son utilisation comme touche de piano. Il permettait un déplacement d'environ  $5\text{cm}$ . En utilisant ce système, les premiers modèles d'instruments de corde et de percussion ont été réalisés.

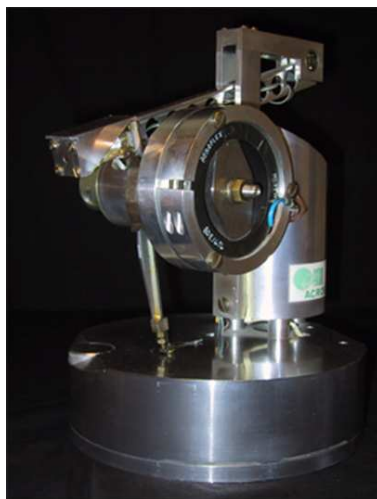


FIGURE 5.2 – *LaTouche*, interface gestuelle inspirée d'une touche de piano, 1981 [Florens, 2008]

A partir du système décrit précédemment, un nouveau dispositif à retour d'effort de type clavier inspiré lui aussi d'un piano a été développé en 1988 [Cadoz et al., 1990]. Ce système est connu sous le nom de *clavier rétroactif modulaire (CRM)*. Comme son nom l'indique, il a une structure modulaire composée de 16 tranches portant chacune une touche permettant un déplacement de  $4\text{cm}$  avec une configuration à bobines mobiles. Ceci permet le partage d'un même circuit de flux d'excitation entre les tranches, comme montré dans la Figure 5.5 [Florens, 2008].

Dans la Figure 5.3, nous pouvons observer le clavier rétroactif modulaire conventionnel et dans la Figure 5.4, deux versions avec différents habillages mécaniques utilisés comme manipulateur : une pince et un stick 2D.

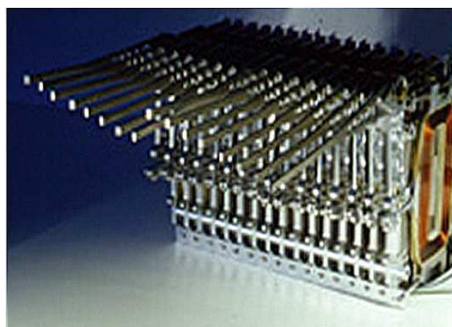


FIGURE 5.3 – Clavier Rétroactif Modulaire inspiré d'un clavier de piano, 1988 [Florens, 2008]

En ce qui concerne l'architecture, un processeur vectoriel AP120 a été utilisé à partir de 1983, initialement sur une machine PDP11 et à partir de 1985 avec une configuration à base de processeurs 68000 sur bus VME [Couroussé, 2008]. Afin de moderniser l'architecture de calcul de cette interface, une architecture Power Challenge quadri-processeur de *Silicon Graphics*, connue sous le nom de *Telluris*, a été

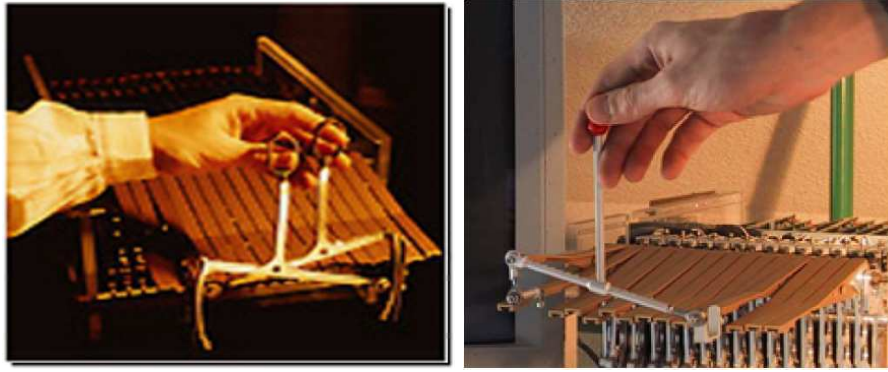


FIGURE 5.4 – Clavier Rétroactif Modulaire avec différents manipulateurs : à gauche la pince et à droite le stick 2D [Florens, 2008]

développée [Uhl, 1996]. Cette nouvelle interface était équipée d'un système d'exploitation de type Unix adapté au temps réel et accessible par une programmation en langage C [Couroussé, 2008].

Malgré l'évolution des systèmes développés et notamment de l'architecture *Telluris*, il s'agissait encore d'un système avec une architecture complexe, encombrante et très difficilement transportable. Cela a amené l'équipe à orienter ses recherches sur un nouveau système avec une architecture plus simple et à la fois portable, permettant de faire un dispositif plus accessible aux autres groupes de chercheurs et pour des démonstrations grand public. Ces recherches ont abouti au développement de la plateforme temps réel ERGON\_X, décrite dans la Section 2.1.4.

### 2.1.2 Les dispositifs haptiques ERGOS

La nouvelle plateforme utilisée dans le cadre de notre étude a été conçue en 2007. Elle est équipée d'un transducteur gestuelle rétroactif haptique de la gamme ERGOS, développée à partir de l'année 2001.

Ces dispositifs sont modulaires avec une configuration en tranches inspirée de leur prédécesseur, le clavier rétroactif modulaire décrit précédemment. Une grande évolution est évidente sur ce nouveau dispositif, notamment en termes de dimensionnement, de la mécanique de ses actionneurs ainsi que de son électronique de conditionnement et de commande. Ils disposent de capteurs de type LVDT « Linear Variable Differential Transformer », des transformateurs différentiels dont le rapport dépend de la position d'un noyau plongeur mobile. Ces noyaux plongeurs mobiles sont liés mécaniquement aux supports mobiles des bobines. Les corps des capteurs restent ainsi fixes [Florens, 2008].

Chaque tranche a une taille d'environ  $1\text{cm}$  d'épaisseur,  $10\text{cm}$  d'hauteur et  $15\text{cm}$  de profondeur. Elle est composée d'une bobine mobile intercalée entre des aimants plats. Ces tranches sont empilées les unes sur les autres. Comme montré dans la Figure 5.5, cet empilement crée un flux magnétique partagé par toutes les bobines [Florens et al., 2004] [Florens, 2008]. La masse associée à une tranche est d'environ  $300\text{kg}$ , sans compter le manipulateur. Elle permet un déplacement de  $22\text{mm}$  avec une force crête à crête de  $200\text{N}$  et une force nominale de  $80\text{N}$  [Florens, 2008].

La plateforme utilisée est un dispositif multi-axes supportant différentes morphologies de manipulateurs. Son nombre de tranches dépend de l'utilisation et donc du type de manipulateur souhaité. Par exemple, deux tranches sont nécessaires pour monter un manipulateur de type stick 2D et trois pour un joystick 3D symétrique. Les touches du clavier sont amovibles, permettant de monter directement sur les tranches le manipulateur le plus adapté. En effet, le nombre de tranches peut être augmenté davantage, sa seule contrainte, au niveau du développement du dispositif, étant sa portabilité donc son poids et sa taille. La

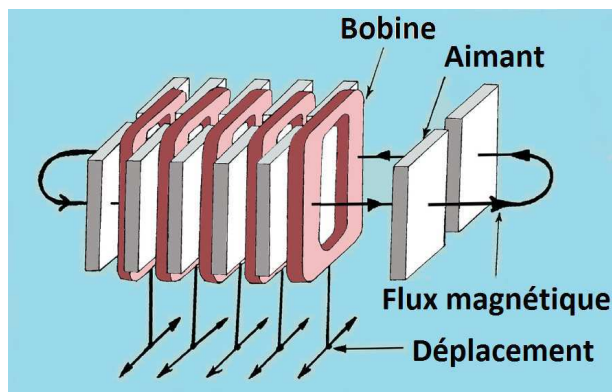


FIGURE 5.5 – Configuration à flux magnétique partagé [Florens, 2008]

difficulté de ce dispositif se pose surtout au niveau de l'extension du simulateur, notamment du conditionneur électronique gérant les échanges entre l'ordinateur et le transducteur gestuelle. En 2011, nous avons développé le dispositif avec le plus grand nombre de degrés de liberté de la gamme ERGOS. Il s'agit d'un dispositif à douze tranches, appelé la console *Gamma* qui est aujourd'hui complètement opérationnel, Figure 5.6.

FIGURE 5.6 – La console *Gamma* à 12 degrés de liberté

Nous avons travaillé sur la construction de ce nouveau dispositif haptique et notamment sur son électronique associée. Pour sa conception et sa construction, nous avons ajouté des tranches supplémentaires et leurs capteurs correspondants et nous avons conçu une nouvelle carte pour la connexion entre le dispositif et l'électronique. Cependant, pour l'extension de l'interface électronique associée, nous avons effectué un travail de conception plus complexe afin notamment d'adapter les cartes comportant les amplificateurs de puissance et les modules de conditionnement pour les capteurs de position. L'électronique de base de la gamme ERGOS étant prévue pour un maximum de huit tranches, nous avons réalisé la conception de nouvelles cartes de puissance et de capteurs pour permettre à l'électronique d'accueillir un dispositif allant jusqu'à 12 tranches, le tout sans augmenter la taille du boîtier électronique. Nous n'avons donc pas limité l'étude réalisée dans le cadre de cette thèse à l'utilisation d'un tel dispositif. En effet, nous avons étendu notre participation aux différentes étapes de sa conception. Une description de ces travaux

est présentée dans la Section 2.1.5.

Le choix des habillages mécaniques utilisés comme manipulateurs est assez large, allant aujourd'hui de la simple touche et le joystick 2D des années quatre-vingts, aux joysticks 3D et 6D. Dans la Figure 5.7, nous pouvons observer la configuration classique des transducteurs gestuels rétroactifs ERGOS à six tranches et dans la Figure 5.8, deux configurations avec différents manipulateurs : un joystick 3D et un joystick 6D.



FIGURE 5.7 – Transducteur gestuel rétroactif à 6 tranches dans la configuration classique de clavier

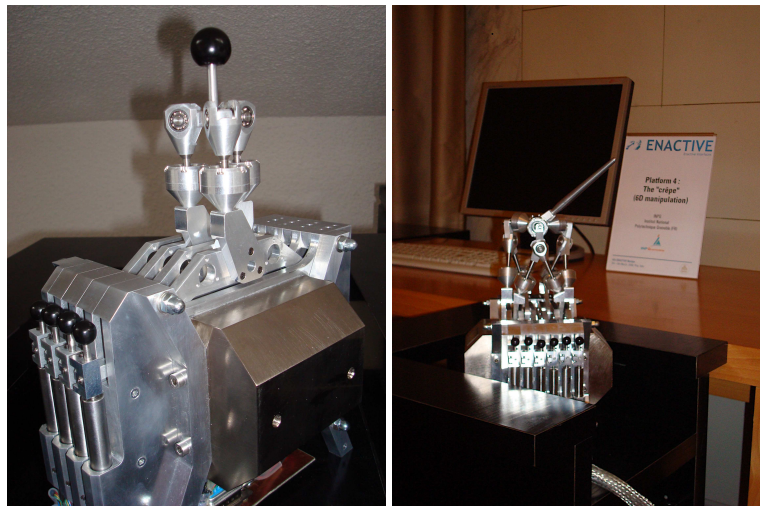


FIGURE 5.8 – Différentes configurations de manipulateurs sur le dispositif ERGOS : à gauche le joystick 3D et à droite le joystick 6D

### 2.1.3 Le conditionneur électronique

Un conditionneur électronique associé au dispositif haptique fait partie de ce simulateur. Il est lié au ordinateur de façon analogique. Son rôle est d'échanger les signaux de position sortant des capteurs et des signaux de force allant aux actionneurs. Il comporte les amplificateurs de puissance pour les actionneurs et les modules de conditionnement pour les capteurs de position [Florens, 2008].

Le boîtier du conditionneur électronique, montré dans la Figure 5.9, possède sur sa face avant des boutons permettant le réglage manuel des signaux de position et la compensation des forces.



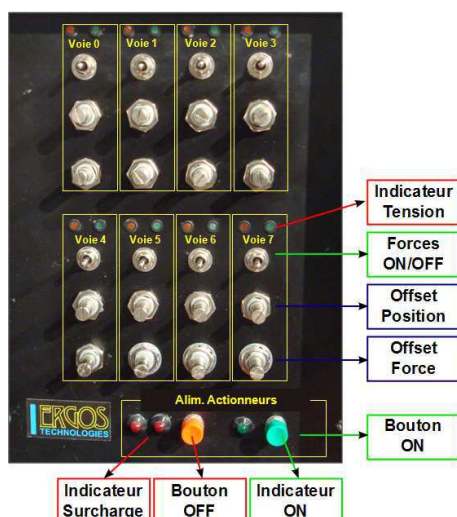


FIGURE 5.9 – Face avant du conditionneur électronique

#### 2.1.4 L'architecture de la plateforme temps-réel ERGON\_X

Un simulateur multisensoriel interactif se compose principalement d'un ordinateur et de différents transducteurs : un transducteur gestuel rétroactif, un écran et des haut parleurs. Ces transducteurs permettent l'interaction entre le ordinateur et l'utilisateur. Dans le cas du transducteur gestuel, il sert à communiquer des informations sur le geste au ordinateur et il récupère en retour des signaux issus du ordinateur. L'écran permet à l'utilisateur d'obtenir une information visuelle et les haut parleurs une information auditive. Pour faciliter cette communication entre les transducteurs et le ordinateur, l'interface doit comporter des périphériques de contrôle adaptées pour chacune d'entre elles, gérant leurs échanges de signaux, par exemple une carte graphique pour la gestion de la visualisation. La Figure 5.10 montre la configuration générale d'un simulateur multisensoriel [Couroussé, 2008].

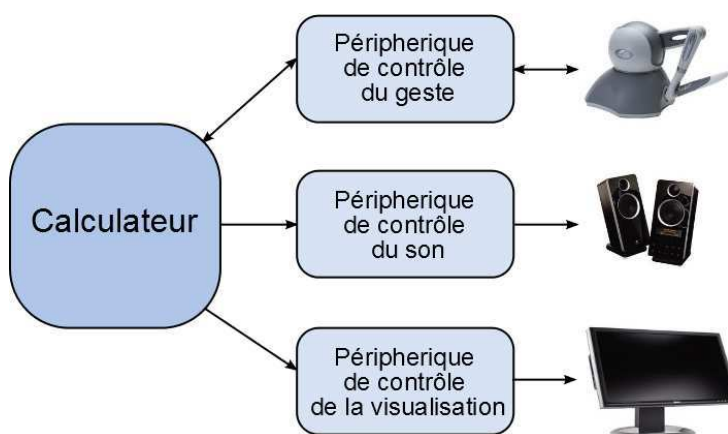


FIGURE 5.10 – Configuration générale d'un simulateur multisensoriel

Le simulateur ERGON\_X, que nous allons utiliser pour les expériences sur l'analyse du couplage décrites dans ce document est composé par :

- Un ordinateur hôte doté d'une carte graphique et d'un système d'exploitation Linux.
- Une carte DSP « Digital Signal Processor » placée au bus PCI « Peripheral Component Interconnect », de la machine hôte.
- Un transducteur gestuel ERGOS, décrit dans la Section 2.1.2.

- Des haut parleurs pour le son.
- Un écran pour la visualisation.

Cette configuration permet une réactivité de  $25\mu s$  donc un fonctionnement de  $40kHz$  permettant un retour d'effort de haute qualité [Florens, 2008].

La carte DSP est considérée comme le cœur de cette architecture. Nous utilisons une carte *TORO* manufacturée par *Innovative Integration*, montrée dans la Figure 5.11.

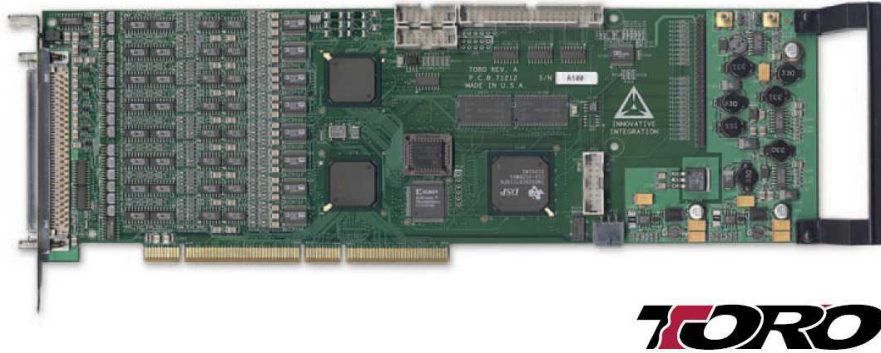


FIGURE 5.11 – Carte *TORO* manufacturée par *Innovative Integration* [Innovative Integration, 2009]

Les caractéristiques basiques de cette carte sont [Innovative Integration, 2009] :

- Un port PCI de 32 ou 64 bits à 3.3/5 V, fonctionnant à 33 MHz
- 16 canaux pour la conversion Analogique-Numérique et Numérique-Analogique avec un taux d'échantillonnage maximal de 250 kHz et une résolution de 16 bit. Chaque canal est considéré comme un signal indépendant sans multiplexage, permettant un vrai échantillonnage simultané et une meilleure isolation des canaux.
- Un DSP *Texas Instruments* TMS320C6711 de 150 MHz, à virgule flottante de 32 ou 64 bits, avec une mémoire SRAM « Static Random Access Memory » à accès dual de 64 Ko.
- Une mémoire SDRAM « Synchronous Dynamic Random Access Memory » de 32Mo.
- Une entrée horloge pour une synchronisation externe et deux horloges internes de 32bits.

Dans la Figure 5.12, nous pouvons observer le diagramme général de la carte *TORO*.

#### 2.1.4.1 Organisation des processus exécutés dans le simulateur

Trois processus principaux s'exécutent dans le simulateur [Couroussé, 2008] :

- Processus système : ce processus est nécessaire au bon fonctionnement du système d'exploitation de l'ordinateur hôte qui héberge la carte DSP où est exécutée le processus simulation. Le DSP ne possède pas de système d'exploitation, donc seul le PC hôte nécessite un processus système.
- Processus superviseur : ce processus supervise ou gère le processus simulation et est le processus père des autres processus nécessaires pour la simulation. Le processus superviseur est complètement désynchronisé du processus simulation. Il n'est pas soumis à des contraintes d'exécution particulières ni à des contraintes de performance de calcul. Il peut être exécuté sur un système d'exploitation conventionnel c'est à dire sur le processeur de l'ordinateur hôte hébergeant la carte DSP.
- Processus simulation : ce processus gère l'exécution de la boucle de simulation et la synchronisation des périphériques de contrôle des transducteurs. Le processus de simulation est exécuté sur le DSP intégré à la carte *TORO* et est ainsi isolé de l'ordinateur hôte et de ses contraintes d'exécution en temps réel. Les modèles à simuler sont séparément implantés en utilisant Code Composer, un outil fourni par *Texas Instruments* pour la programmation du DSP.





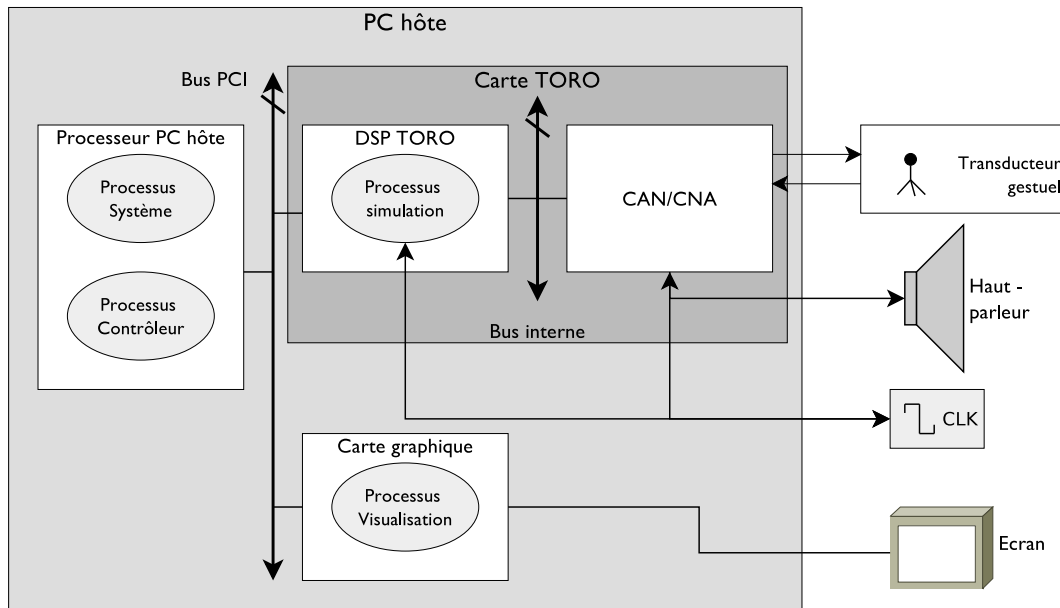


FIGURE 5.13 – Architecture de la plateforme de simulation ERGON\_X

Ceci facilite l'utilisation ainsi que le développement de nouveaux modèles sur la plateforme temps réel.

### 2.1.5 La console Gamma

La console Gamma est une extension de la plateforme de simulation ERGON\_X. Elle a été développée dans le cadre de cette thèse. Cependant, nous n'utiliserons que la précédente plateforme.

En 2011, nous avons développé avec ERGOS Technologies<sup>1</sup> un nouveau simulateur haptique appelé la console Gamma. Ce simulateur a été développé dans le cadre de la création de la plateforme Art-Science-Technologie (AST) pour l'enseignement lors d'une collaboration avec l'école PHELMA de Grenoble INP. Ce simulateur a une configuration à 12 degrés de liberté supportée par un dispositif haptique de la gamme ERGOS. Il est composé d'un clavier modulaire à 12 tranches et peut être équipé de touches mais également de tous les autres habillages mécaniques de cette gamme, dont les sticks 2D, 3D et 6D (Figure 5.14). L'objectif de cette plateforme possédant plus de degrés de liberté est de permettre l'exécution de plus de gestes dans le cadre de la simulation interactive et de la création artistique ainsi que l'implémentation de nouveaux modèles d'interaction requérant un nombre plus élevé de degrés de liberté.

La principale difficulté que nous avons rencontrée pour la conception de cette nouvelle plateforme est l'adaptation du boîtier électronique permettant de contrôler jusqu'à 12 axes (degrés de liberté) avec un encombrement identique aux boîtiers standard limités à 8 axes. Cette intégration a nécessité un effort important en particulier pour parvenir à une disposition des étages de puissance compact et compatible avec leurs contraintes de dissipation. En pratique, les amplificateurs sont regroupés comme dans les versions précédentes par cartes de 4 axes. Le nouveau boîtier peut donc contenir jusqu'à 3 cartes montées sur un dissipateur commun. Par ailleurs, le module de conditionnement des signaux capteurs a été standardisé par la conception d'une carte générique à 4, 8 ou 12 axes.

Les tâches réalisées concernent plus particulièrement :

- La définition de la connectique générale entre les différents composants de la plateforme (PC-Carte TORO-Conditionneur électronique-Dispositif haptique).

1. Start-up issue du Laboratoire ICA/ACROE.

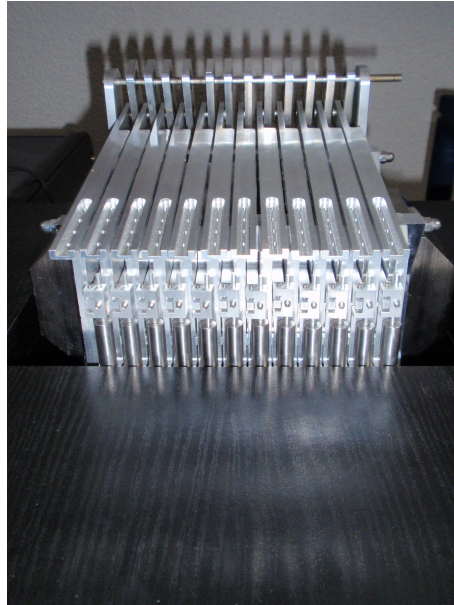


FIGURE 5.14 – Dispositif haptique à 12 degrés de liberté pour la console Gamma

- La conception de la carte capteur pour récupérer les signaux issus des capteurs du dispositif haptique.
- La conception de cartes de puissance pour traiter les forces renvoyées par le simulateur en direction du dispositif haptique.
- La conception de la carte automate.
- La conception d'une nouvelle carte de liaison entre le dispositif haptique et l'électronique.
- La conception d'une nouvelle carte de liaison directe entre l'électronique et la carte TORO permettant de remplacer le boîtier de liaison de la version précédente du simulateur. Cette carte simplifie les connexions et permet de connecter directement le DSP au conditionneur électronique. Elle permet également d'avoir les sorties audio sur le conditionneur électronique.

Cette console est aujourd'hui opérationnelle en deux exemplaires, avec une grande qualité du retour d'effort, nécessaire pour les expériences de simulation haptique et notamment dans le cadre de l'analyse du couplage. Elle a été équipée de versions actualisées des bibliothèques et des outils logiciels pour la modélisation physique temps réel. Des logiciels complémentaires adaptés à cette nouvelle évolution des stations ERGON\_X ont également été réalisés.

La Figure 5.6 montre une image de la console Gamma complète et opérationnelle.

## 2.2 Échange de données entre le DSP et l'ordinateur hôte

Plusieurs données sont échangées entre les différentes composantes du simulateur lors d'une simulation. Les principaux échanges ayant lieu entre l'ordinateur hôte et le DSP sont :

- Chargement du fichier binaire sur le DSP  
Le processus simulation étant exécuté sur le DSP, la première action pour la simulation est de charger le fichier binaire contenant le modèle à simuler. Ce fichier binaire est généré séparément en utilisant l'outil Code Composer. Il est enregistré préalablement sur l'ordinateur hôte et est copié dans la mémoire de la carte TORO avant le lancement de la simulation.
- Supervision du processus simulation et mise à jour de l'état du modèle  
Le processus simulation exécuté sur le DSP est contrôlé par le processus superviseur exécuté sur l'ordinateur hôte. Les communications entre le processus superviseur et le processus simulation sont

effectuées grâce à l'échange de drapeaux de type flottant de 32 bits, à travers l'écriture et la lecture de la mémoire SDRAM de la carte *TORO*. L'automate d'états du programme principal exécuté sur le DSP est illustré dans la Figure 5.15. Il est l'esclave du processus superviseur et comporte quatre états : initialisation (INIT), prêt (READY), en marche (RUNNING) et terminé (TERMINATED). Lorsque le programme principal est lancé, il démarre l'initialisation du DSP (INIT) puis le processus simulation passe à l'état prêt (READY). Il attend ensuite dans cet état le message du processus superviseur c'est à dire que l'ordinateur hôte lui demande de lancer la simulation (RUNNING) ou de terminer le programme (TERMINATED). L'ordinateur hôte contrôle chaque changement d'état et le communique au DSP. Enfin, dès que le changement d'état a lieu dans le processus simulation, le DSP envoie une confirmation à l'ordinateur hôte.

– Mise à jour de l'affichage

Lorsqu'un changement d'état est effectué lors d'une simulation, le DSP l'écrit et l'ordinateur hôte le lit dans la SDRAM. Ces informations permettent la mise à jour de l'affichage du modèle pris en charge par le processus visualisation exécuté sur l'ordinateur hôte. Ces mises à jour sont réalisées avec une fréquence d'environ 200 Hz et sont asynchrones au processus simulation. La quantité de données échangées dépend principalement des dimensions et du scénario visuel du modèle simulé.

– Mise à jour des paramètres du modèle

Les paramètres du modèle à simuler sont définis préalablement dans un fichier enregistré sur l'ordinateur hôte. Ils peuvent être modifiés au cours de la simulation. Le format de ces paramètres est flottant de 32 bits. Ils sont mis à jour dans SDRAM de la carte *TORO* par l'ordinateur hôte et sont lus par le DSP.

D'autres échanges ont lieu entre le processus simulation exécuté sur le DSP et les transducteurs :

– Communication entre le DSP et le conditionneur électronique

A chaque pas de simulation, le processus simulation lit et écrit des données, sous la forme d'entiers signés de 16 bits, dans les FIFO des convertisseurs analogique-numérique et numérique-analogique de la carte *TORO*. Les 16 canaux bidirectionnels de cette carte permettent au processus simulation de recevoir les données de position du dispositif haptique et de lui renvoyer des données de force issues de cette simulation. En 2011, nous avons réalisé une amélioration du dispositif électronique, simplifiant les connexions et permettant de connecter directement le DSP au conditionneur électronique. Dans la version précédente du simulateur, la connexion entre le conditionneur électronique et la carte *TORO* se réalisait via un boîtier de liaison. Nous avons alors conçu une carte électronique permettant de supprimer ce boîtier et de réaliser une connexion directe. Elle permet également de rediriger les sorties audio sur le conditionneur électronique. Ces modifications sont décrites dans la Section 2.1.5.

– Génération des signaux pour les sorties sonores

Les signaux sonores analogiques sont générés directement à partir des modèles physiques calculés sur le DSP. Comme dans le cas précédent, ces données sont écrites dans les FIFO des convertisseurs. Dans la version actuelle du simulateur *ERGON\_X*, les haut parleurs peuvent être directement connectés aux sorties analogiques des convertisseurs de la carte *TORO*. La modification réalisée en 2011 et décrite dans le paragraphe précédent, a ainsi permis d'équiper le conditionneur électronique de deux sorties analogiques stéréo connectées directement aux voies des convertisseurs numérique-analogique.

Les mémoires ont un rôle central dans les communications entre le DSP et l'ordinateur hôte. Comme décrit dans la Section 2.1.4, la carte *TORO* possède une mémoire SDRAM de 32 Mo et le DSP intégré sur cette carte, une mémoire SRAM à accès dual de 64 Ko.

Les cycles de lecture et d'écriture étant plus lents sur la première mémoire, elle est alors utilisée pour stocker les données externes à la boucle temps réel, c'est à dire les paramètres d'initialisation et de configuration de la carte *TORO*, les paramètres d'initialisation des modules Cordis Anima (Annexe A)

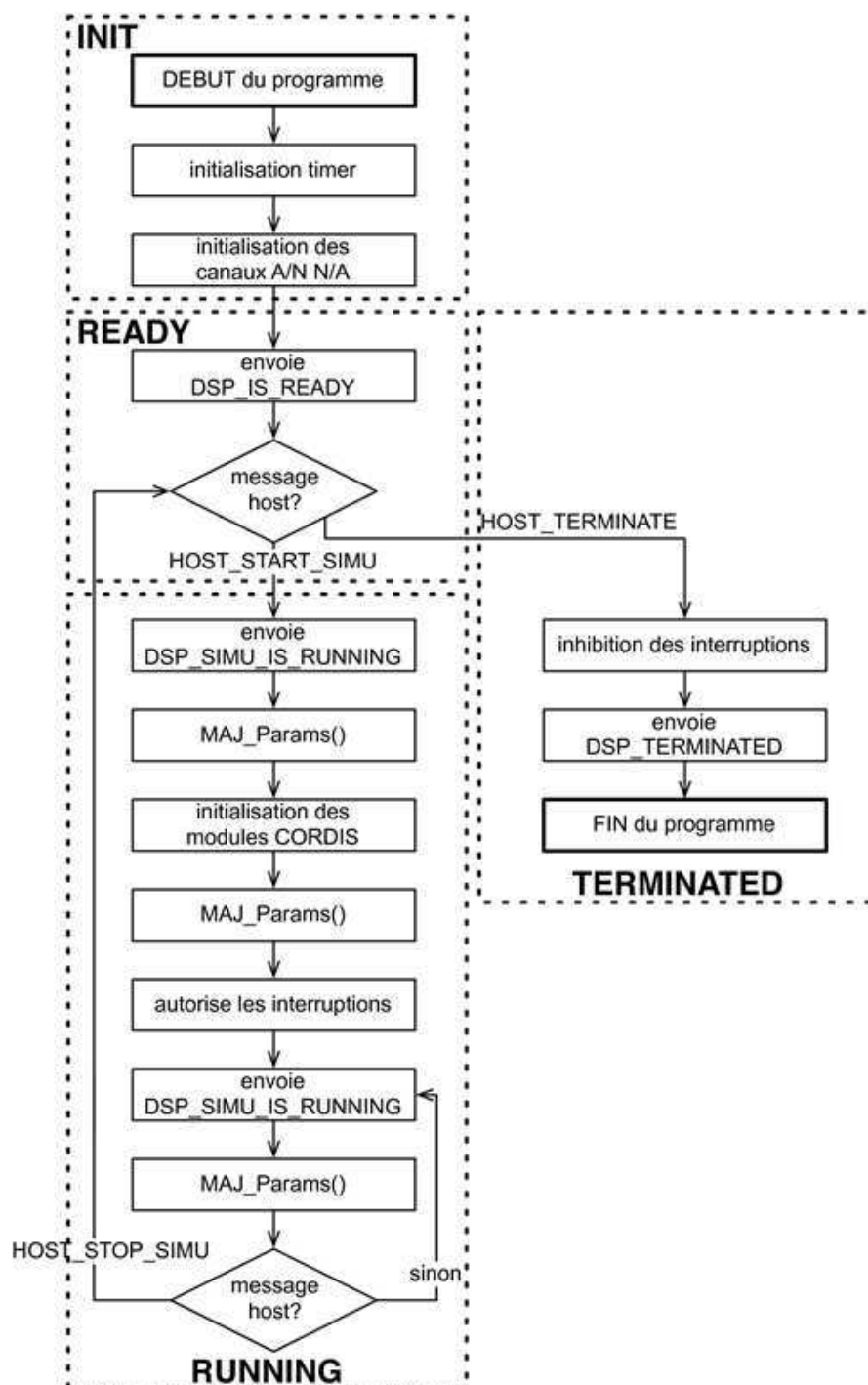


FIGURE 5.15 – Automate d'états du programme principal exécuté sur le DSP [Couroussé, 2008]

du modèle ainsi que certaines données de la simulation comme les paramètres algorithmiques et les vecteurs d'états.

En ce qui concerne la SRAM, elle est limitée à 64 Ko mais est beaucoup plus rapide. Elle est alors utilisée pour stocker les données critiques liées à la boucle temps réel [Couroussé, 2008]. Dans cette mémoire, nous trouvons une zone pour les vecteurs d'interruption, une zone pour le code pour la simulation temps réel, une zone pour l'échange de données entre le processus simulation exécuté sur le DSP et le processus superviseur exécuté sur la machine hôte, ainsi qu'une zone de mémoire cache.

L'organisation des zones mémoire de la SRAM est montrée dans la Figure 5.16.

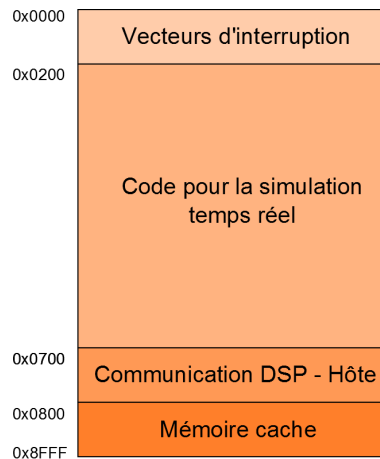


FIGURE 5.16 – Organisation des zones mémoire de la SRAM

La zone mémoire [0x7000;0x7FFF] utilisée pour l'échange de données entre le DSP et l'ordinateur hôte est distribuée comme suit [Couroussé, 2008] :

- [0x7000;0x7003] Envoi de messages du DSP vers l'ordinateur hôte.
- [0x7004;0x7007] Envoi de messages de l'ordinateur hôte vers le DSP
- [0x7010;0x7013] Gain global d'amplification des données de position
- [0x7014;0x7017] Gain global d'amplification des données de force
- [0x7018;0x701C] Gain global d'amplification des données de son
- [0x7100;0x74FF] Envoi des paramètres algorithmiques de l'ordinateur hôte vers le DSP
- [0x7500;0x7FFF] Envoi des vecteurs d'état du DSP vers l'ordinateur hôte

Cette distribution est montrée dans la Figure 5.17.

### 3 Mise en œuvre d'un protocole d'acquisition de données

Comme défini dans la Section 5.3 du Chapitre 2, nous voulons lors de l'utilisation de l'interface haptique, réaliser une mesure du geste, plus précisément des signaux de force et de position issus du simulateur. Nous mettons alors en œuvre un protocole d'acquisition de données sur la plateforme temps réel ERGON\_X.

Ce protocole d'acquisition doit permettre de récupérer d'une part les données de position de la touche du TGR, issues des capteurs de position, lorsque la simulation est en marche et que le TGR est manipulé par un opérateur humain et d'autre part les données de force calculées par le simulateur et renvoyées aux actionneurs. Pour l'implémentation de ce protocole, nous devons prendre en compte le transfert régulier de toutes les données mesurées lors de leur transmission et de leur intégrité lors de chaque cycle de lecture-écriture de la mémoire.

Deux solutions ont été envisagées et testées pour l'acquisition des données :

- un transfert par DMA « Direct Access Memory »
- un Buffer circulaire

Leur implémentation, leurs avantages et leurs inconvénients sont expliqués par la suite.

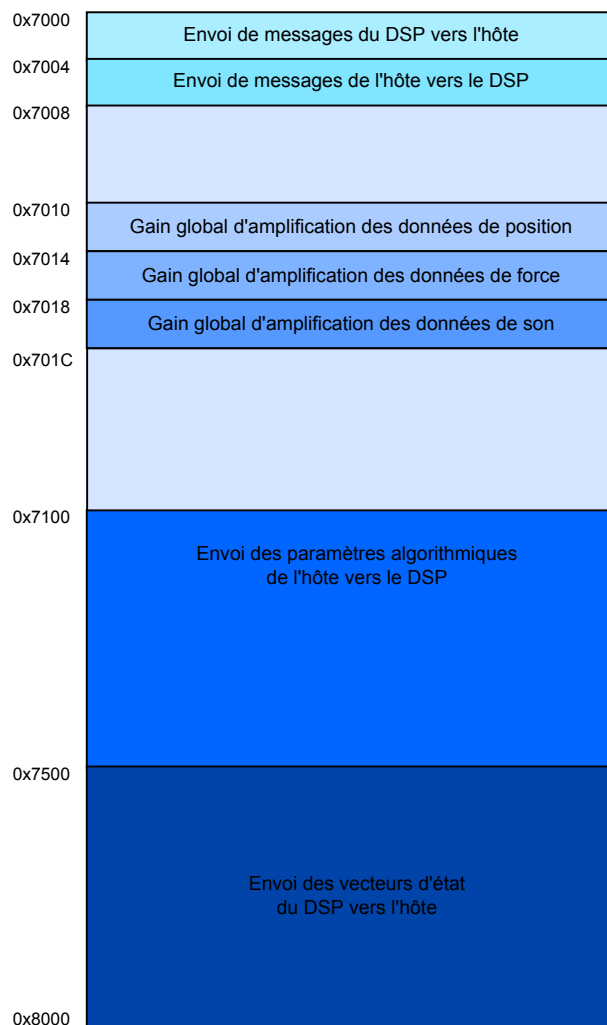


FIGURE 5.17 – Zone mémoire de communication entre le PC hôte et le DSP dans la mémoire SRAM

### 3.1 L'acquisition par DMA

Initialement, un transfert de données par DMA a été considéré. Les communications entre l'ordinateur hôte et le DSP peuvent être implémentées en utilisant le DMA assurant ainsi le transfert rapide des données sans utiliser les ressources du processeur de l'ordinateur hôte.

Ce transfert de données implique une modification importante de l'architecture logicielle existante, notamment en ce qui concerne l'échange de données entre le DSP et l'ordinateur hôte. Du point de vue de l'ordinateur hôte, ces modifications se décomposent en trois étapes :

- L'utilisation des bibliothèques *MALIBU* fournies par le fabricant de la carte DSP, *Innovative Integration* [[Innovative Integration, 2009](#)] , au lieu des bibliothèques développées au laboratoire ICA/ACROE spécialement pour la plateforme temps réel.
- L'implémentation d'une nouvelle bibliothèque *Toro* pour remplacer le périphérique de contrôle libtd.
- La révision de l'application existante afin d'utiliser la nouvelle bibliothèque.

Ces changements peuvent être décrits de façon générale grâce à la Figure 5.18.

L'utilisation de la nouvelle bibliothèque *Toro* nécessite également des adaptations du côté du DSP. Ces modifications impliquent l'utilisation des bibliothèques *PISMO* fournies par *Innovative Integration* et la révision de l'application existante (libErgonSim).

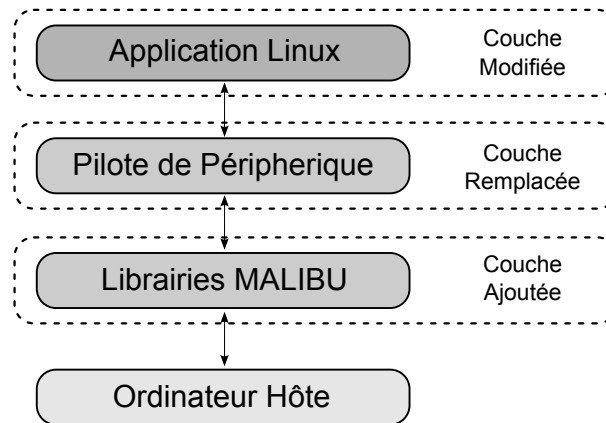


FIGURE 5.18 – Changements logiciels implémentés sur l'ordinateur hôte

Les changements implémentés du côté du DSP sont décrits de façon générale dans la Figure 5.19.

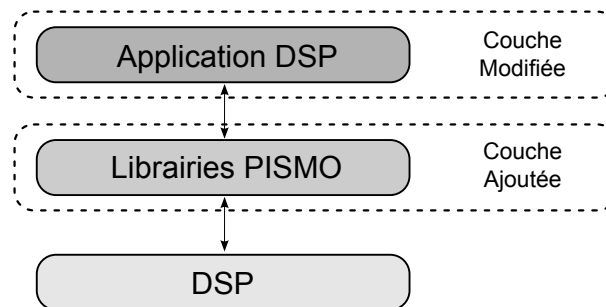


FIGURE 5.19 – Changements logiciels implémentés sur le DSP

Cette nouvelle librairie *Toro* simplifie et optimise l'utilisation de la plateforme. Cependant, elle présente des inconvénients puisque tous les modèles et tous les scénarios de simulation réalisés précédemment avec l'échange de données standard doivent être réécrits pour pouvoir fonctionner. De plus, d'après les tests effectués sur cette nouvelle architecture logicielle, la récupération des données de force et de position est permise jusqu'à une fréquence maximale de  $5kHz$ , bien inférieure à la fréquence maximale du simulateur pouvant aller jusqu'à  $44.1kHz$ . Nous devons alors étudier une autre solution permettant d'utiliser directement sur la plateforme tous les autres modèles existants.

### 3.2 L'acquisition par Buffer Circulaire

Ce type d'acquisition permet de garder l'architecture initiale du simulateur en redistribuant l'espace mémoire pour la communication entre le DSP et l'hôte (Figure 5.17) pour y ajouter une zone réservée aux échanges de données de force et de position que nous souhaitons acquérir. La récupération de ces données à chaque pas de simulation est effectuée grâce à l'implémentation d'un buffer circulaire, ajouté à l'architecture logicielle standard de la plateforme temps réel ERGON\_X. La nouvelle organisation de l'espace mémoire est montrée dans la Figure 5.20.

Le buffer circulaire est une structure de données de taille fixe permettant l'ajout de données les unes après les autres. Son fonctionnement est montré dans la Figure 5.21. Initialement, le buffer est vide et un premier élément peut être ajouté. Le deuxième élément est ensuite ajouté à la position suivante et ainsi de suite. Lorsque le pointeur arrive à la position finale du buffer, il revient à la première position. Ce buffer est dit circulaire car il reboucle et n'a pas de fin proprement dite. Lorsqu'une donnée est lue, il



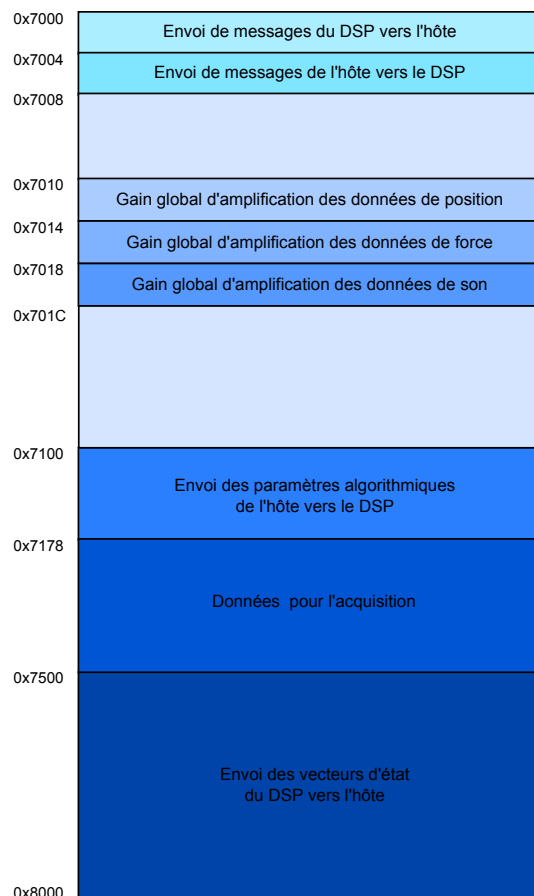


FIGURE 5.20 – Nouvelle organisation des zones mémoire de la SRAM

s'agit toujours de la donnée la plus ancienne sur le buffer. Le buffer a donc besoin de quatre pointeurs : deux pour délimiter le début et la fin de la mémoire, un pointeur de lecture et un pointeur d'écriture. Le pointeur d'écriture ne doit pas dépasser le pointeur de lecture au risque d'effacer d'anciennes données. Les communications entre le DSP et l'ordinateur hôte s'effectuent ainsi en utilisant les deux pointeurs de lecture et d'écriture.

Le buffer circulaire est utilisé sur la carte *TORO* et appartient au processus simulation. Pour son implémentation, nous devons faire des changements sur le processus simulation ainsi que sur le processus superviseur de l'ordinateur hôte. L'implémentation sur le DSP est réalisée en langage C++ utilisant l'outil Code Composer et le développement sur l'ordinateur hôte est réalisé en langage C.

Un nouveau paramètre utilisé par l'ordinateur hôte pour indiquer au DSP à quel moment il doit commencer à envoyer les données pour l'acquisition a également été ajouté. Ce paramètre est envoyé à n'importe quel moment de la simulation par l'ordinateur hôte dès qu'il reçoit la demande de l'utilisateur d'enregistrer les données. La configuration de ce paramètre se réalise de la même façon que pour les paramètres de simulation.

Pour commencer l'enregistrement des données lors de la simulation, l'utilisateur doit appuyer sur la touche « R » et ensuite il doit appuyer sur la touche « S » pour finaliser cet enregistrement et sauvegarder les données dans un fichier.

Dans ce fichier, une donnée temporelle supplémentaire accompagne les données de force et de position. Elle correspond à l'indexe du pas de simulation durant lequel les données de force et de position sont acquises. Cette information temporelle est très utile pour vérifier la cohérence du fichier enregistré et doit



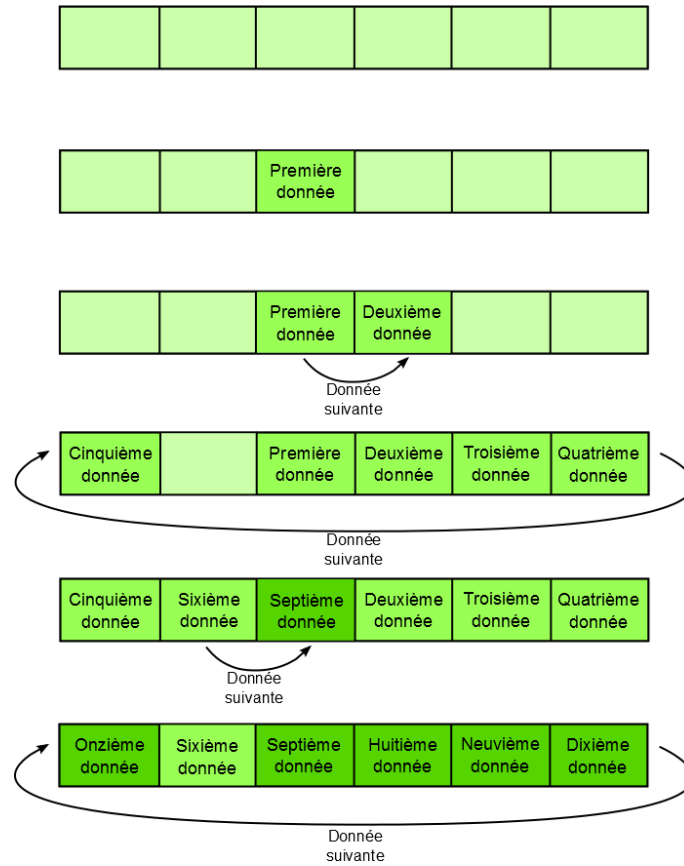


FIGURE 5.21 – Buffer circulaire

s'incrémenter à chaque pas de simulation, sans avoir de doubles ni de trous.

Le fichier de données récupérées utilise donc une structure à trois colonnes contenant les données temporelles, les données de position et les données de force acquises lors de la simulation, comme le montre la Figure 5.22.

Données temporelles	Données de force	Données de position
Index Initial	Donnée de force correspondante à l'index	Donnée de position correspondante à l'index
⋮	⋮	⋮
Index final	Donnée de force correspondante à l'index	Donnée de position correspondante à l'index

FIGURE 5.22 – Structure à trois colonnes du fichier de données acquises lors de la simulation

Même si la plateforme temps réel utilisée peut atteindre des fréquences de simulation jusqu'à  $44.1\text{kHz}$ , nous avons fixé la fréquence de simulation maximale à  $10\text{kHz}$  afin d'avoir le temps de récupérer les données de position pour chaque pas de simulation. Au delà de  $10\text{kHz}$ , nous ne sommes plus en mesure de garantir la récupération des données pour chaque pas de simulation. Lors d'une simulation de 5 secondes, ce protocole de récupération permet d'enregistrer 50000 échantillons de données de position

et 50000 échantillons de données de force. Ces échantillons sont enregistrés dans un fichier, comme décrit précédemment, et sont utilisés pour identifier les paramètres du système.

La méthode la plus facilement intégrable à la plateforme existante est l'organisation des zones mémoire, l'implémentation et l'utilisation d'un buffer circulaire. Elle permet également l'affichage de la simulation. Nous avons donc choisi cette méthode pour l'acquisition des données lors de nos expériences.

Enfin, la configuration temps réel interfacée avec le protocole de récupération de données est montrée dans la Figure 5.23.

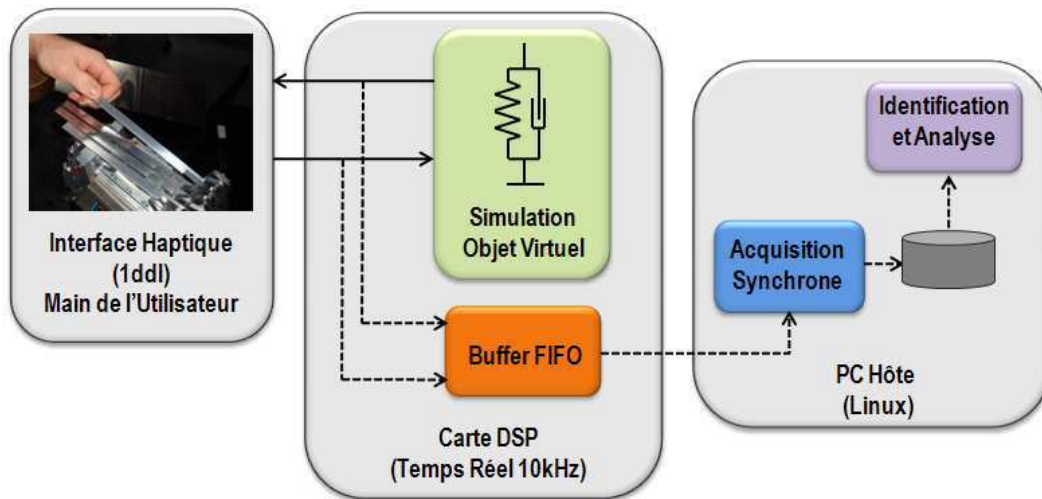


FIGURE 5.23 – Configuration temps réel interfacée avec le protocole de récupération de données

## 4 Equivalence entre les paramètres du simulateur et les paramètres réels

Nous allons traiter maintenant le problème de l'équivalence entre les paramètres du simulateur et les paramètres physiques réels.

En utilisant le protocole d'acquisition de données décrit dans la Section 3, nous pouvons récupérer les données du geste lors d'une situation de simulation haptique. Pour l'analyse de ces données recueillies, nous devons trouver leur signification physique et leurs unités.

Ces données sont alors utilisées pour l'identification des paramètres des modèles du couplage. La correspondance entre les paramètres estimés issus de l'identification et les paramètres du modèle simulé n'est pas une tâche directe. Comme nous l'expliquerons par la suite, ces équivalences dépendent de réglages électroniques propres au simulateur ainsi que de certains gains logiciels. Un étalonnage du simulateur est nécessaire pour trouver une équivalence entre les valeurs des paramètres de l'environnement virtuel (c'est à dire le temps discret et les paramètres Cordis Anima du simulateur) et ceux de l'environnement réel (c'est à dire le temps continu et les grandeurs physiques).

### 4.1 Relations entre l'environnement réel et l'environnement virtuel

Le premier pas pour établir les équivalences entre les données et les paramètres virtuels et réels est d'analyser la façon dont la mise en relation de l'environnement réel à l'environnement virtuel est effectuée.

Une variable réelle est une variable mesurable et peut être représentée par des unités physiques. Une variable virtuelle est une donnée informatique issue d'une acquisition ou d'un calcul. Il existe des relations conventionnelles entre l'environnement réel et l'environnement virtuel. Dans le cadre de la modélisation physique, ces relations sont liées à la construction du modèle et aux calculs réalisés suivant une loi physique comme dans le cas de Cordis Anima (voir Annexe A). Nous définissons alors les données virtuelles comme des forces virtuelles ou des positions virtuelles, selon la nature des données. Un transducteur crée une relation entre ces grandeurs informatiques et les grandeurs du monde réel. Dans le cas de l'interface haptique, cette relation est établie à travers les capteurs mesurant une variable réelle pour la transformer en une variable virtuelle utilisée pour réaliser des calculs suivant des lois physiques. Ces calculs donnent des forces virtuelles qui sont transformées en variables réelles mesurables via les actionneurs et qui sont retournées à l'interface haptique.

SIGNAL	MONDE RÉEL	MONDE VIRTUEL
Position	x	X
Force	f	F

TABLEAU 5.1 – Variables de position et de force dans les mondes réel et virtuel

Nous établissons les variables de force et de position dans l'environnement réel et virtuel, comme montré dans le Tableau 5.1 (Nous utiliserons par la suite les majuscules pour représenter les variables et les paramètres de l'environnement virtuel et les minuscules pour ceux de l'environnement réel). La relation entre ces deux environnements est donnée par des opérateurs d'échantillonnage et de reconstruction utilisés comme suit :

$$X \xrightarrow{\mathcal{A}} x \quad (5.1)$$

$$f \xrightarrow{\mathcal{B}} F \quad (5.2)$$

où  $\mathcal{A}$  représente l'opérateur d'échantillonnage pour le passage d'une position réelle à une position virtuelle, et  $\mathcal{B}$  représente l'opérateur de reconstruction pour le passage d'une force virtuelle à une force réelle.

$X$  et  $F$  sont des signaux à temps discrets (des suites numériques) et  $x$  et  $f$  sont des signaux à temps continu.

Les moyennes de ces signaux sont respectivement notées  $\bar{X}$ ,  $\bar{F}$  pour les signaux à temps discret et  $\bar{x}$ ,  $\bar{f}$  pour les signaux à temps continu et sont définies par les équations suivantes :

$$\bar{X} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{n=-N}^{n=N} X(n) \quad (5.3)$$

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad (5.4)$$

Si nous nous intéressons au régime statique, c'est à dire aux relations entre les moyennes respectivement de  $X$  et  $x$ , et de  $f$  et  $F$ , alors les opérateurs  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$  se réduisent à des multiplications par des

constantes  $\alpha$  et  $\beta$ . Nous montrons que si  $X$  et  $x$ , et  $F$  et  $f$  sont liés par les relations d'échantillonnage et de reconstruction définies dans (5.1) et (5.2) relatives aux opérateurs  $\mathcal{A}$  et  $\mathcal{B}$ , alors  $\bar{X}/\bar{x} = \alpha$  est une constante indépendante de  $x$  mais dépendante de l'opérateur  $\mathcal{A}$ . De la même façon  $\bar{f}/\bar{F} = \beta$  est une constante indépendante de  $f$  mais dépendante de l'opérateur  $\mathcal{B}$ . Ceci nous permet de définir les gains statiques des opérateurs d'échantillonnage et de reconstructions définies dans (5.1) et (5.2) par :

$$\alpha = |\mathcal{A}| \quad (5.5)$$

$$\beta = |\mathcal{B}| \quad (5.6)$$

où  $\alpha$  est le gain statique de l'opérateur d'échantillonnage et où  $\beta$  est le gain statique de l'opérateur de reconstruction.

Dans les paragraphes suivants, nous évaluons les gains statiques de quelques opérateurs d'échantillonnage et de reconstruction classiques.

#### 4.1.1 Cas d'un échantillonneur idéal

Exprimons la relation entre les moyennes  $\bar{X}$  et  $\bar{x}$ . Soit  $\mathcal{A}$  tel que  $X \xrightarrow{\mathcal{A}} x$  avec  $X(n) = x(nT_e)$ , où  $T_e$  correspond à la période d'échantillonnage. D'après (5.3) et (5.4), la moyenne de  $X$ ,  $\bar{X}$ , peut être exprimée par la formule suivante :

$$\bar{X} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{n=-N}^{n=N} x(nT_e) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{n=-N}^{n=N} \frac{1}{T_e} \int_{nT_e - \frac{T_e}{2}}^{nT_e + \frac{T_e}{2}} x(nT_e) dt \quad (5.7)$$

Cette moyenne peut être approximée par :

$$\bar{X} \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2NT_e} \sum_{n=-N}^{n=N} \int_{nT_e - \frac{T_e}{2}}^{nT_e + \frac{T_e}{2}} x(t) dt \quad (5.8)$$

En posant  $T = NT_e$ , nous obtenons :

$$\bar{X} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt = \bar{x} \quad (5.9)$$

Dans ce cas, nous observons que le gain statique :

$$\boxed{|\mathcal{A}| = 1} \quad (5.10)$$

#### 4.1.2 Cas d'un reconstituteur impulsif

Nous considérons un reconstituteur impulsif sans délai. La force réelle  $f(t)$  en temps continu peut être exprimée à partir de la force virtuelle  $F(n)$  en temps discret :

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_e) F(n) \quad (5.11)$$

Si nous considérons  $F$  comme une suite constante telle que  $\forall n$  :

$$F(n) = F_o \quad (5.12)$$

A partir de l'équation 5.11, nous obtenons :

$$f(t) = F_o \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_e) \quad (5.13)$$

Nous calculons la moyenne de  $f$  avec la formule suivante :

$$\bar{f} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F_o \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_e) \quad (5.14)$$

Le résultat de ce calcul est :

$$\bar{f} = \frac{1}{T_e} F_o \quad (5.15)$$

D'après 5.15 et 5.12, le gain statique  $|B|$  est donné par :

$$\boxed{|B| = \frac{1}{T_e}} \quad (5.16)$$

#### 4.1.3 Cas d'un bloqueur d'ordre zéro

Si nous considérons le cas d'un bloqueur d'ordre zéro, la force réelle  $f(t)$  en temps continu peut être exprimée à partir de la force virtuelle  $F(n)$  en temps discret :

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \Pi_{\theta}(t - nT_e) F(n) \quad (5.17)$$

où  $\Pi_{\theta}$  représente une fonction porte de durée  $\theta$ .

Comme dans le cas précédent, nous considérons  $F$  comme une suite constante telle que  $\forall n$   $F(n) = F_o$

L'équation 5.17 devient :

$$f(t) = F_o \sum_{-\infty}^{\infty} \Pi_{\theta}(t - nT_e) \quad (5.18)$$

La moyenne de 5.18 est donnée par :

$$\bar{f} = \frac{\theta}{T_e} \quad (5.19)$$

D'après 5.19 et 5.12, le gain statique  $|B|$ , dans le cas où  $\theta < T_e$ , est défini par :

$$|B| = \frac{\theta}{T_e} \quad (5.20)$$

Dans le cas d'un bloqueur classique où  $\theta = T_e$ , le gain statique  $|B|$  devient :

$$|B| = 1 \quad (5.21)$$

Il est important de noter qu'aucun des échantillonneurs ni des reconstituteurs réels ne correspondent à un modèle simple comme ceux présentés dans les exemples précédents. Nous admettrons cependant qu'ils sont caractérisés par un gain statique dont la connaissance sera obtenue par la mesure. Ce sont justement ces mesures qui constituent le calibrage statique de l'interface à retour d'effort présenté dans les sections suivantes.

#### 4.1.4 Définition des gains statiques de position et de force dans le cas d'un simulateur ERGON\_X

D'après l'analyse précédente, dans le cas d'un simulateur temps réel ERGON\_X, si nous considérons les positions et les forces comme des valeurs moyennes, nous pouvons définir des gains statiques de position et de force.

Ces gains sont appliqués aux signaux de position  $x$  entrant dans le simulateur pour devenir la position virtuelle  $X$ , ainsi qu'à la force virtuelle  $F$  calculée par le simulateur avant de générer une force réelle  $f$ . Nous définissons  $\alpha$ , le gain de position et  $\beta$ , le gain de force. Pour passer de la position réelle en entrée  $x$  à la position virtuelle  $X$  gérée par les algorithmes, nous devons fixer un coefficient  $\alpha$ . Dans le cas de la force pour passer de la force réelle  $f$  à la force virtuelle  $F$ , nous devons régler le coefficient  $\beta$ .

La transformation entre le monde réel et le monde virtuel et vice-versa se fait alors selon les relations suivantes :

$$X = \alpha x \quad (5.22)$$

$$f = \beta F \quad (5.23)$$

Ces gains  $\alpha$  et  $\beta$  ont une composante logicielle et une composante due au conditionneur électronique. Les gains logiciels sont définis par  $G_x$  pour la position et par  $G_f$  pour la force et les gains électroniques sont définis par  $\alpha_x$  pour la force et par  $\beta_f$  pour la force. Les relations entre les gains et ses composantes sont donc :

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_x G_x \\ \beta = \beta_f G_f \end{cases} \quad (5.24)$$

Ces gains représentent :

- $\alpha_x$  et  $\beta_f$  sont les gains relatifs à la structure interne du conditionneur électronique. Ces points de réglages analogiques de la carte des capteurs et de la carte des actionneurs ne sont pas modifiables au niveau algorithmique mais seulement au niveau électronique.
- $G_x$  et  $G_f$  sont respectivement les gains globaux de position et de force du système. Ces points de réglages numériques logiciels peuvent être facilement modifiés dans le fichier de paramètres du modèle.

L'équivalence générale entre les positions et les force virtuelles est alors donnée par les relations suivantes et montrée dans la Figure 5.24 :

$$\begin{cases} X = \alpha_x G_x x \\ f = \beta_f G_f F \end{cases} \quad (5.25)$$

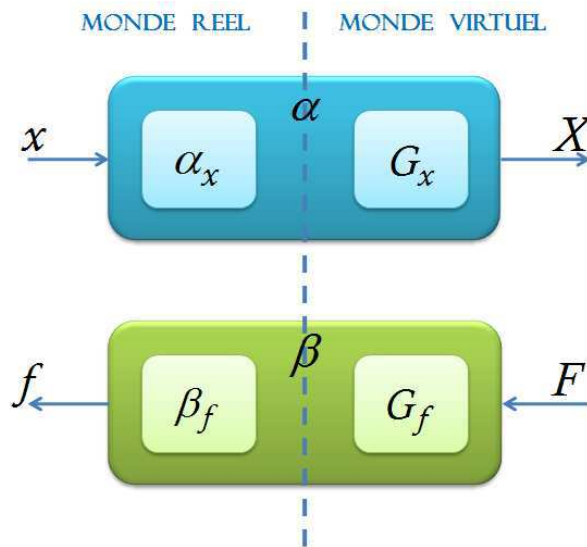


FIGURE 5.24 – Équivalence entre l'environnement réel et l'environnement virtuel

## 4.2 Equivalence entre les paramètres réels et virtuels

### 4.2.1 Définition des paramètres de base

Les modèles implantés sur la plateforme temps réel sont créés en utilisant le formalisme de modélisation physique Cordis Anima (voir Annexe A). Ces modèles sont simulés à partir des algorithmes définis et des paramètres introduits dans la plateforme temps réel. Cependant, ces paramètres ne représentent pas des grandeurs physiques. Ils représentent des grandeurs virtuelles dont la relation avec des unités réelles n'a

pas été préalablement établie. Nous allons analyser ce problème et présenter des équivalences entre les paramètres réels et les paramètres virtuels.

Considérons un oscillateur élémentaire (module CEL du formalisme Cordis Anima). Il est composé d'une masse (module MAS), d'un ressort et d'une viscosité (module REF) liés au sol (module SOL), comme le montre la Figure 5.25.

Si nous considérons l'oscillateur réel, les paramètres sont :

- la masse  $m$
- la viscosité  $b$
- la raideur  $k$

Pour le module CEL représentant un oscillateur virtuel, les paramètres sont :

- la masse  $M$
- la viscosité  $B$
- la raideur  $K$

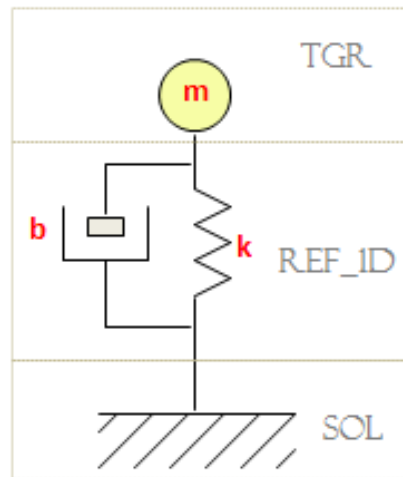


FIGURE 5.25 – Module « CEL » du formalisme Cordis Anima

En fait, si nous considérons les équations et les paramètres physiques de ce système défini précédemment, nous trouvons trois normalisations cohérentes : la correspondance par la masse, par la raideur ou par la viscosité. En effet, si nous fixons la correspondance d'un paramètre de l'environnement réel et de l'environnement virtuel, nous pourrions déduire la transformation des autres paramètres. Cependant, les paramètres équivalents dépendent du réglage des coefficients électroniques propres au simulateur et des coefficients logiciels.

Chaque normalisation a des avantages et des inconvénients selon les opérations de conversion à réaliser. Même si nous avons pensé choisir une normalisation par correspondance de la masse du fait qu'il est plus naturel pour l'utilisateur d'imaginer une masse d'un certain poids que d'imaginer une raideur ou une viscosité d'une certaine valeur, nous avons choisi la normalisation par correspondance de la raideur. En fait, grâce à cette normalisation, nous avons une équivalence entre la position et la force de l'environnement réel en temps continu et du monde virtuel en temps discret, indépendamment de la période d'échantillonnage. Ces équivalences dépendent seulement du réglage des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  pouvant être réglés à 1 grâce aux gains logiciels  $G_x$  et  $G_f$ .

Cette normalisation est la plus commune dans le cadre de l'haptique car nous nous intéresserons aux mesures de force et de position lors de nos expériences.

Dans la Figure 5.26, nous pouvons observer l'algorithme de la raideur suivant la normalisation par correspondance de la raideur. Les algorithmes de la viscosité et de la masse suivant cette normalisation



sont également montrés respectivement dans les Figures 5.27 et 5.28.

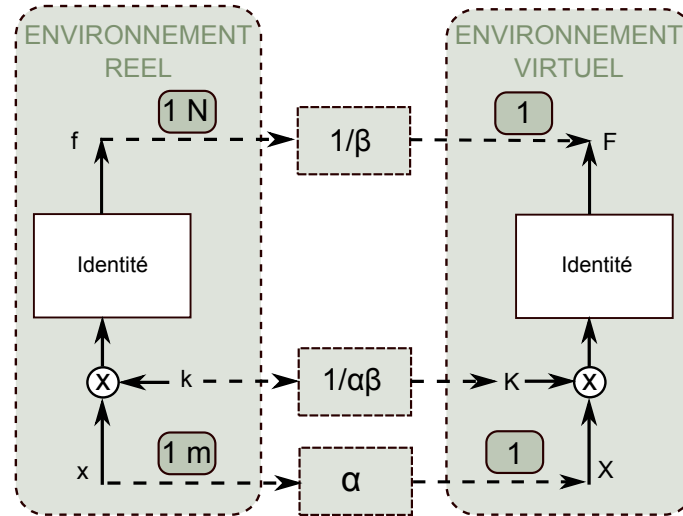


FIGURE 5.26 – Algorithme de la raideur suivant la normalisation par correspondance de la raideur

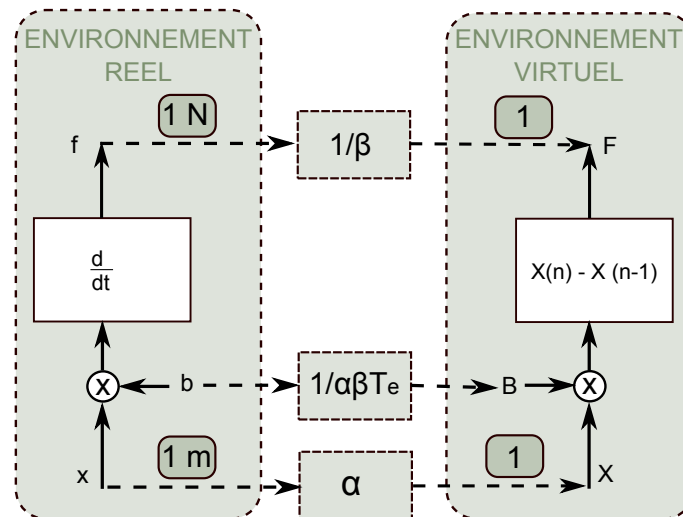


FIGURE 5.27 – Algorithme de la viscosité suivant la normalisation par correspondance de la raideur

A partir de ces algorithmes, nous pouvons trouver les équivalences des paramètres.

#### 4.2.2 Définition de la position, de la vitesse et de l'accélération selon Cordis Anima

Afin de trouver une équivalence entre les paramètres réels et virtuels, nous devons tout d'abord analyser la définition de la position, de la vitesse et de l'accélération à l'intérieur du simulateur. Lorsque les signaux sont acquis par le simulateur, après les convertisseurs, nous avons des signaux numériques discrets. Le formalisme Cordis Anima, utilisé pour la modélisation sur la plateforme temps réel, est basé sur la notion de suite récurrente pour le calcul des vitesses et des accélérations à partir des valeurs discrètes.

Les variables de position et de force à l'instant  $n$  sont définies respectivement par  $X(n)$  et  $F(n)$ . L'unité de temps interne de Cordis Anima est la période d'échantillonnage. L'écart entre deux échantillons est alors unitaire.

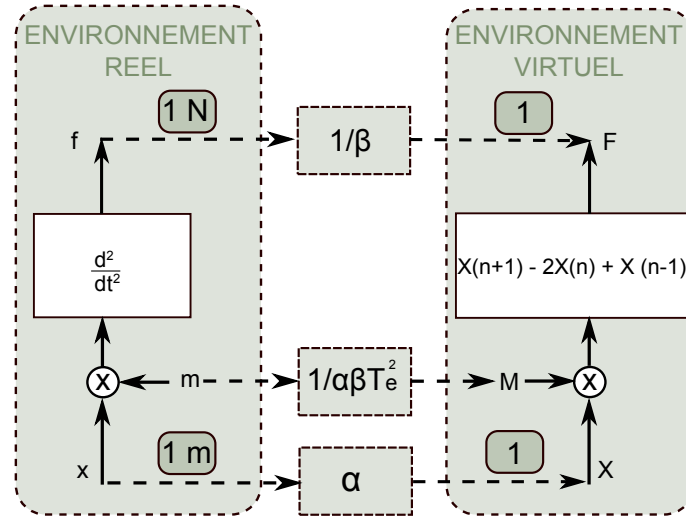


FIGURE 5.28 – Algorithme de la masse suivant la normalisation par correspondance de la raideur

A partir de la loi fondamentale de la dynamique  $F = MA$ , où  $F$  est la force,  $M$  la masse et  $A$  l'accélération, nous avons une approximation discrète de la vitesse à l'instant  $n$ ,  $V(n)$ , à partir des positions  $X(n)$  et  $X(n-1)$  aux instants  $n$  et  $n-1$  :

$$V(n) = X(n) - X(n-1) \quad (5.26)$$

Nous avons également une approximation discrète de l'accélération à l'instant  $n$ ,  $A(n)$ , à partir des vitesses  $V(n)$  et  $V(n-1)$  aux instants  $n$  et  $n-1$  :

$$A(n) = V(n) - V(n-1) \quad (5.27)$$

Elle peut aussi être exprimée en fonction de la position par :

$$A(n) = X(n+1) - 2X(n) + X(n-1) \quad (5.28)$$

A partir de ces définitions de la position, de la vitesse et de l'accélération discrètes, nous pouvons calculer les forces en fonction des paramètres  $M$ ,  $B$  et  $K$  du module CEL. Nous définissons :

– la force en fonction de la raideur  $K$  avec l'équation suivante :

$$F(n) = KX(n) \quad (5.29)$$

– la force en fonction de la viscosité  $B$  avec l'équation suivante :

$$F(n) = B(X(n) - X(n-1)) \quad (5.30)$$

– la force en fonction de la masse  $M$  avec l'équation suivante :

$$F(n) = M(X(n+1) - 2X(n) + X(n-1)) \quad (5.31)$$

#### 4.2.3 Equivalence entre la raideur virtuelle et la raideur réelle

La position réelle est supposée constante de valeur  $x_o$  :

$$x(t) = x_o \quad (5.32)$$

A partir de l'équation 5.22, la position virtuelle peut être définie par la relation :

$$X(n) = \alpha x(t) = \alpha x_o \quad (5.33)$$

A partir des équations 5.29 et 5.33, nous avons :

$$F(n) = KX(n) = K\alpha x_o \quad (5.34)$$

Selon l'équation 5.23, la force réelle  $f(t)$  est alors définie par :

$$f(t) = \beta \alpha K x_o \quad (5.35)$$

Sachant que :

$$f(t) = kx(t) \quad (5.36)$$

et à partir des équations 5.32 et 5.35, la relation entre la raideur réelle et la raideur virtuelle est alors donnée par :

$$k = \alpha \beta K \quad (5.37)$$

#### 4.2.4 Equivalence entre la viscosité virtuelle et la viscosité réelle

Dans ce cas, la vitesse,  $v_o$ , est considérée constante. La position réelle est donc définie par la formule :

$$x(t) = v_o t \quad (5.38)$$

A partir de l'équation 5.22, la position virtuelle peut être définie par la relation :

$$X(n) = \alpha x(t) = \alpha v_o t \quad (5.39)$$

A partir de l'équation 5.30 et 5.39, la force peut être exprimée en fonction de la viscosité et de la période d'échantillonnage avec la relation suivante :

$$F(n) = B(X(n) - X(n-1)) = B\alpha v_o T_e \quad (5.40)$$

Selon l'équation 5.23, la force réelle  $f(t)$  est alors définie par :

$$f(t) = \beta \alpha B v_o T_e \quad (5.41)$$

Sachant que :

$$f(t) = b \frac{dx(t)}{dt} \quad (5.42)$$

et à partir des équations 5.38 et 5.41, la relation entre la viscosité réelle et la viscosité virtuelle est alors donnée par :

$$b = \alpha \beta T_e B \quad (5.43)$$

#### 4.2.5 Equivalence entre la masse virtuelle et la masse réelle

L'équivalence entre la masse virtuelle et la masse réelle est retrouvée en considérant l'accélération constante,  $g_o$ . La position réelle est donc définie par la formule :

$$x(t) = g_o \frac{t^2}{2} \quad (5.44)$$

A partir de l'équation 5.22, la position virtuelle peut être définie par la relation :

$$X(n) = \alpha x(t) = \alpha g_o \frac{n^2 T_e^2}{2} \quad (5.45)$$

A partir de l'équation 5.31 et 5.45, la force peut être exprimée en fonction de la masse par :

$$F(n) = M(X(n+1) - 2X(n) + X(n-1))) = M \alpha g_o T_e^2 \quad (5.46)$$

Selon l'équation 5.23, la force réelle  $f(t)$  est alors définie par :

$$f(t) = \beta \alpha M g_o T_e^2 \quad (5.47)$$

Sachant que :

$$f(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad (5.48)$$

La relation entre la masse réelle et la masse virtuelle est alors donnée par :

$$m = \alpha \beta M T_e^2 \quad (5.49)$$

#### 4.2.6 Récapitulatif des équivalences

A partir des résultats obtenus, les équivalences entre les valeurs données de force, de position et des paramètres du module CEL dans l'environnement réel et les valeurs dans l'environnement virtuel, selon la normalisation par correspondance de la raideur, sont montrées dans le Tableau 5.2

GRANDEUR PHYSIQUE	VALEUR RÉELLE MESURÉE	EQUIVALENCE VIRTUELLE
Position [x - X]	$1[m]$	$\alpha$
Force [f - F]	$1[N] = 1[\frac{Kg \cdot m}{s^2}]$	$\frac{1}{\beta}$
Temps [t]	$1[s]$	$\frac{1}{T_e}$
Masse [m]	$1[Kg]$	$\frac{1}{\alpha \beta T_e^2}$
Raideur [k]	$1[\frac{N}{m}] = 1[\frac{Kg}{s^2}]$	$\frac{1}{\alpha \beta}$
Viscosité [b]	$1[\frac{N \cdot s}{m}] = 1[\frac{Kg}{s}]$	$\frac{1}{\alpha \beta T_e}$

TABLEAU 5.2 – Equivalences entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs virtuelles selon la normalisation par correspondance de la raideur. Dans ce cas, les gains de position et de force peuvent être réglés à 1.

### 4.3 Étalonnage Statique

Pour retrouver l'équivalence entre les paramètres virtuels utilisés pour la simulation temps réel et les paramètres réels correspondant à des grandeurs physiques et entre les positions ou les forces réelles et virtuelles, nous avons besoin de réaliser un étalonnage statique afin de trouver le gain de position,  $\alpha$ , et de force,  $\beta$ .

#### 4.3.1 Le modèle Test\_à\_8 et le réglage des positions

Le modèle de Test\_à\_8, est un modèle de base implanté sur la plateforme temps réel ERGON\_X afin de permettre à l'utilisateur de régler le niveau des positions et des forces sur les tranches du TGR. Plus précisément, il permet de régler à la position zéro jusqu'à 8 tranches pour le modèle standard. Il existe également pour une version à 16 tranches. L'interface visuelle indique la position de chacune des tranches et la position zéro est représentée par une ligne verte au milieu de l'écran (Figure 5.29). Un affichage des valeurs de position est également disponible dans la partie supérieur gauche de l'écran. Ce modèle considère une masse réelle (le TGR) attachée à un ressort avec une viscosité virtuelle (module REF).

La position zéro d'une touche de TGR correspond à la position au milieu du déplacement total possible de la tranche c'est à dire si le déplacement total est d'environ 20mm, la position zéro se trouve à environ 10mm de la position de repos de la tranche. A partir de cette position, nous pouvons mesurer des déplacements de  $\pm 10mm$ , comme montré dans la Figure 5.30. Les mesures réels sont effectuées sur l'axe vertical du point A.

Le réglage de la position zéro est effectué en utilisant les potentiomètres de réglage d'offset de position placés sur la face avant du conditionneur électronique (Figure 5.11). Il suffit de régler la position zéro dans l'environnement réel en mettant la tranche à 10mm de sa position de repos et de placer ensuite la représentation de la touche dans l'environnement virtuel sur la ligne verte au milieu de l'écran à l'aide des potentiomètres d'offset de position.

L'objectif est d'évaluer le coefficient  $\alpha$ . Comme défini précédemment, la correspondance entre la position virtuelle  $X$  et la position réelle  $x$  est donnée par la relation 5.25.

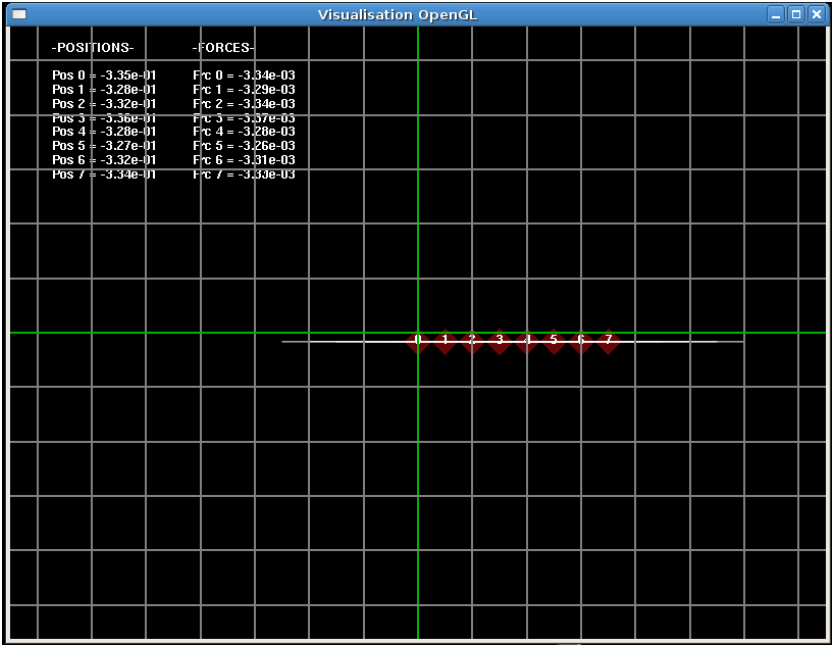


FIGURE 5.29 – Interface visuelle du modèle Test\_à\_8, montrant la position de 8 tranches du TGR

Le coefficient  $\alpha$  peut alors être exprimé comme le rapport entre la variation du déplacement virtuel, appelé  $\Delta X$ , et la variation du déplacement réel,  $\Delta x$  :

$$\alpha = \frac{\Delta X}{\Delta x} \quad (5.50)$$

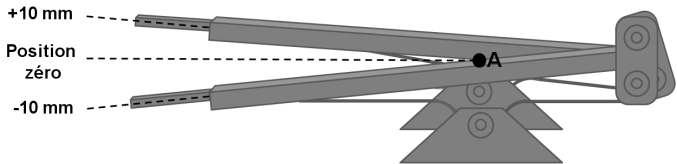


FIGURE 5.30 – Déplacement des tranches du TGR de  $\pm 10\text{mm}$  à partir de la position zéro

Pour calculer la valeur du coefficient  $\alpha$ , nous effectuons différents déplacements de la touche afin de vérifier les variations dans l'environnement réel et virtuel. Ayant réglé la position zéro à  $10\text{mm}$  de la position de repos de la tranche. Nous déplaçons la touche à 8 et  $12\text{mm}$  de la position de repos ( $\pm 2\text{mm}$  de la position zéro) et grâce à l'interface visuelle nous vérifions le déplacement du TGR dans l'environnement virtuel. Les mesures réalisées sur un TGR à 4 tranches sont affichées dans le Tableau 5.3.

DÉPLACEMENT $x$	$X$ TOUCHE 0	$X$ TOUCHE 1	$X$ TOUCHE 2	$X$ TOUCHE 3
8 mm	-1,78	-1.86	-1.83	-1.75
10 mm	0	0	0	0
12 mm	1.82	1.86	1.79	1.76

TABLEAU 5.3 – Déplacement virtuel  $X$  des touches 0 à 3 selon le déplacement réel  $x$

Pour la touche 3, nous avons observé qu'un déplacement de  $2mm$  dans le monde réel correspond à environ 1,755 unités de position virtuelles, notées  $uXv$ .

A partir des données du Tableau 5.3 et de l'équation 5.50 nous pouvons calculer la valeur du coefficient  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{\Delta X}{\Delta x} = \frac{1.755uXv}{2.10^{-3}m} = 877.5 \frac{uXv}{m} \quad (5.51)$$

Le coefficient  $\alpha$  est composé de deux parties : la partie électronique  $\alpha_x$  et la partie logicielle  $G_x$ . La partie logicielle est fixée par l'utilisateur dans le fichier de paramètres à  $G_x = 10$ . A partir de l'équation 5.24 nous obtenons :

$$\alpha_x = \frac{\alpha}{G_x} = 87.75 \frac{uXv}{m} \quad (5.52)$$

Nous connaissons maintenant la valeur du réglage interne du système  $\alpha_x = 87.75 \frac{uXv}{m}$ .

#### 4.3.2 Réglage des forces

Afin de trouver le coefficient  $\beta$ , nous devons effectuer un réglage des forces. Pour cela, nous devons activer les forces sur le conditionneur électronique (Figure 5.11) et ensuite régler la position virtuelle  $X$  à zéro à l'aide de la représentation visuelle et de l'offset de force. Nous considérons alors que sans aucun poids extérieur ajouté à  $X = 0$ ,  $F = 0$ .

L'objectif est de calculer le coefficient  $\beta$ . La correspondance entre la force virtuelle  $F$  et la force réelle  $f$  est donnée par la relation 5.25. En utilisant une méthode similaire à celle du coefficient  $\alpha$ , le coefficient  $\beta$  peut être calculé comme le rapport entre la variation de la force réelle appliquée à la touche  $\Delta f$  et la variation de la force virtuelle  $\Delta F$  :

$$\beta = \frac{\Delta f}{\Delta F} \quad (5.53)$$

Pour analyser ces variations de force, nous devons faire des mesures en ajoutant différents poids à la touche : 100, 200 et 500 gr. Nous vérifions ensuite la position et la force correspondante à la touche libre et avec chacun de ces poids.

Les forces correspondantes à l'ajout des poids sont de 0.981, 1.962 et 4.905N respectivement.

En ajoutant chacun de ces poids à la touche du TGR, nous connaissons la variation de force réelle  $\Delta f$  qu'il produit et nous vérifions sur l'écran la variation de position virtuelle  $\Delta X$  et la variation de force virtuelle  $\Delta F$ .

Pour le calcul de  $\Delta f$ , nous devons également prendre en compte le point où la force est appliqué sur le bras du levier. Nous choisissons d'ajouter les poids à l'extrémité de la touche du TGR (point B) et nous mesurons la force au centre de la tranche (point A) (voir Figure 5.31).

Pour calculer l'effet du bras du levier, nous avons réalisé les mesures des segments  $\bar{OA}$  et  $\bar{AB}$  en fonction du poids ajouté. Nous pouvons observer dans la Figure 5.31 que le segment  $\bar{OA}$  ne varie pas. Par contre,

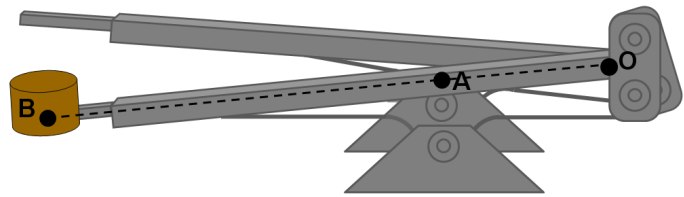


FIGURE 5.31 – Touche du TGR avec un poids ajouté

la longueur du segment  $\overline{AB}$  dépend du poids ajouté. Les mesures et les calculs réalisés sont montrés dans le Tableau 5.4.

POIDS AJOUTÉ (gr)	SEGMENT $\overline{OA}$ (mm)	SEGMENT $\overline{AB}$ (mm)	LEVIER $l = \frac{\overline{OA} + \overline{AB}}{\overline{AB}}$
100	90	150	2.6666
200	90	155	2.7222
500	90	170	2.8888

TABEAU 5.4 – Calcul de l'effet du bras du levier selon le poids ajouté

A partir des mesures montrées dans le Tableau 5.4, nous calculons les forces et les masses équivalentes au point A dans le Tableau 5.5.

POIDS AJOUTÉ (gr) POINT B	MASSE (gr)		FORCE (N)	
	POINT A	POINT B	POINT A	POINT B
	$m_A$	$m_B = ml^2$	$f_A$	$f_B = fl$
100	100	711.07	0.981	2.6159
200	200	1482.07	1.962	5.3409
500	500	4172.58	9.905	14.1695

TABEAU 5.5 – Masses et forces équivalentes aux points A et B selon le poids ajouté

Pour chaque poids attaché, nous observons sur l'écran le déplacement virtuel et la force virtuelle correspondante. Les résultats sont affichés dans le Tableau 5.6.

POIDS AJOUTÉ (gr)	$\Delta f$ (N)	$\Delta X$ (uXv)	$\Delta F$ (uFv)	$\beta = \frac{\Delta f}{\Delta F}$
100	2.6159	-1.27	-1.27	2.0597
200	5.3409	-2.59	-2.59	2.0621
500	14.1695	-6.49	-6.49	2.1832

TABEAU 5.6 – Variation du déplacement virtuel et de la force selon le poids ajouté

A partir des variations des forces virtuelles obtenues par des variations de forces réelles, nous calculons la valeur du coefficient  $\beta$ . Dans la dernière colonne du Tableau 5.6 sont montrées les valeurs de  $\beta$  calculées selon le poids ajouté à la touche. D'après ces valeurs nous avons une valeur moyenne de  $\beta = 2.1016$ .

Comme dans le cas du coefficient  $\alpha$ , le coefficient  $\beta$  est composé de deux parties : le gain électronique  $\beta_f$  et le gain logiciel  $G_f$ . Le gain logiciel est fixé par l'utilisateur dans le fichier de paramètres à  $G_f = 0.01$ .

A partir de l'équation 5.23 nous obtenons :

$$\beta_f = \frac{\beta}{G_f} = 210.16 \frac{N}{uFv} \quad (5.54)$$



Nous connaissons maintenant la valeur du réglage interne du système  $\beta_f$ .

A partir de l'équation 5.53, nous avons un autre moyen de retrouver le coefficient  $\beta$  selon la variation du déplacement virtuel. Nous savons que si  $F = KX$  alors  $\Delta F = K\Delta X$ . De plus, la valeur de la raideur  $K$  fixée dans le fichier de paramètres est connue :

$$\beta = \frac{\Delta f}{\Delta F} = \frac{\Delta f}{K\Delta X} \quad (5.55)$$

#### 4.4 Mesure du poids du complexe touche-tranche

Nous réalisons ensuite une manipulation afin de mesurer le poids du complexe touche-tranche du TGR. Cela nous permettra de vérifier le gain de force  $\beta$  calculé précédemment.

En boucle fermée avec les forces en mode actif, nous utilisons le réglage de l'offset de force  $F_o$  pour trouver le point d'équilibre c'est à dire le point où la force exercée par le poids de la touche  $f_{p_o} = F_o$ . Pour cela, il suffit de régler la position de la touche sur la ligne verte indiquant la position zéro à l'aide de l'interface visuelle et du potentiomètre de réglage de l'offset de force.

En boucle ouverte avec les forces en mode inactif, nous réglons l'offset de position de façon qu'il annule la force de sortie envoyée par les algorithmes au TGR. Cette force est donnée par :

$$F_{sortie} = f_{p_o} + \beta KX \quad (5.56)$$

Cette force envoyée au TGR, est montrée par des indicateurs de tension, des leds rouges et des leds vertes placées sur le conditionneur électronique (Figure 5.11). Le point où le signal de force est nul correspond au passage des leds de rouge à verte (ou vice-versa). En utilisant l'offset de position  $X_o$ , nous cherchons le point  $X = X_o$  tel que la force de sortie soit nulle  $f_{sortie} = 0$ .

A partir de l'équation 5.56, nous pouvons en déduire la force exercée par le poids de la touche :

$$f_{p_o} = -\beta KX_o \quad (5.57)$$

Suite à ce test, nous obtenons, à l'aide de l'interface visuelle, la valeur annulant la force de sortie  $X_o = 1,62$ . Connaissant également la valeur du coefficient  $\beta = 2.1016$  trouvée précédemment et celle de  $K = 1$ , réglée sur le fichier de paramètres, nous retrouvons la force exercée par le poids du complexe touche-tranche  $f_{p_o} = 3.4045N$ , donc un poids  $p_o = 0.3470Kg$ .

Ce poids correspond au poids du complexe touche tranche estimé à environ  $340gr$  c'est à dire  $300gr$  pour la tranche et  $40gr$  pour la touche. La détermination du poids du complexe touche-tranche est importante afin de valider que la normalisation adoptée soit correcte pour gérer l'interaction entre l'opérateur, les objets physiques réels (TGR, touches, tranches) et les objets physiques virtuels (modules Cordis Anima).

#### 4.5 Test de mesure de la raideur réelle

Un autre test a été réalisé afin de retrouver empiriquement la raideur  $k$  et de valider les résultats obtenus précédemment.

Les étapes préliminaires à suivre sont les réglages des positions à zéro en utilisant l'offset de position  $X_o$  et le réglage des forces à zéro en mode actif en utilisant l'offset de force  $F_o$ . Un poids est ensuite ajouté à

la touche au point B comme pour le calcul du coefficient  $\beta$ . Ce poids produit une variation de force réelle  $\Delta f$  que nous pouvons calculer facilement au point A, ainsi qu'une variation du déplacement réel  $\Delta x$  qui peut être mesurée manuellement. Nous pouvons également mesurer les valeurs du déplacement virtuel  $\Delta X$  et de la variation de force virtuelle  $\Delta F$  à l'aide de l'interface graphique. A partir de ces mesures, nous pouvons calculer la raideur réelle équivalente avec :

$$k = \frac{\Delta f}{\Delta x} \quad (5.58)$$

Les mesures réalisées et les calculs de la raideur réelle équivalente sont affichés dans le Tableau 5.7.

POIDS AJOUTÉ (gr)	MESURES RÉELLES		MESURES VIRTUELLES		$k$ RÉELLE $k = \frac{\Delta f}{\Delta x}$	$\beta$ SOUHAITÉ $\beta_{souhaité} = \frac{k}{\alpha}$
	$\Delta f$	$\Delta x$	$\Delta F$	$\Delta X$		
100	2.6159	$-1.5e-3$	-1.25	-1.25	1743.9	1.9874
200	5.3409	$-3e-3$	-2.52	-2.52	1780.3	2.0288
500	14.1695	$-7.5e-3$	-6.65	-6.65	1889.3	2.1530

TABLEAU 5.7 – Masses et forces équivalentes selon le poids

D'après le Tableau 5.7, la valeur moyenne trouvée pour la raideur équivalente est  $k = 1804.5$ . Grâce à l'équation 5.37, nous savons que  $k = \alpha\beta K$ . Nous pouvons donc valider la valeur  $k = 1804.5$  avec la valeur de  $\alpha = 877.5 \frac{uXv}{m}$  trouvée précédemment et la valeur de  $\beta = 2.1016 \frac{N}{uFv}$  trouvée par étalonnage. Nous trouvons une valeur de  $k = 1844.2$  très proches avec une erreur inférieure à 3%.

La fréquence propre d'oscillation du système peut être calculée avec la formule suivante :

$$freq = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.59)$$

Avec les valeurs obtenues pour la raideur équivalente réelle  $k$  et pour la masse du complexe touche-tranche, nous obtenons une fréquence de  $freq = 12.09 Hz$ .

## 4.6 Test de fréquence

Nous avons réalisé un modèle supplémentaire composé d'une masse réelle, de la touche du TGR et d'un ressort de raideur virtuelle  $K$ . La force calculée est donc  $F = KX$ . Nous avons fixé le paramètre  $K = 1$  afin de le faire coïncider avec celui du modèle test\_à\_8 et de pouvoir comparer les mesures obtenues avec celles des deux modèles.

Les gains logiciels de position et de force, sont réglés respectivement à  $G_x = 10$  et à  $G_f = 0.01$  dans le fichier de paramètres.

Lorsque la simulation est lancée, nous faisons osciller la touche en lui appliquant une force externe. La position virtuelle  $X$  de la touche est enregistrée dans un fichier à l'aide du protocole d'acquisition. Ces données de position sont lues et leur courbe est tracée en utilisant le logiciel MATLAB dans la Figure 5.32.

La fréquence est alors calculée à partir de ces données de position. Elle est égale au nombre de cycles effectués par unité de temps :

$$freq = \frac{No.cycles}{temps} = \frac{5}{0.42} = 11.90 Hz \quad (5.60)$$

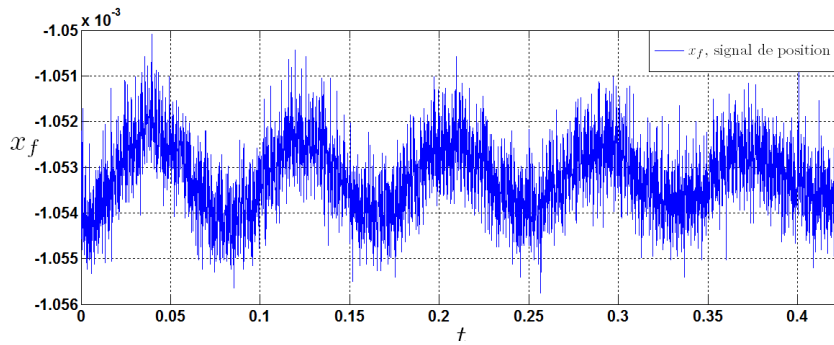


FIGURE 5.32 – Oscillation de la touche du TGR lors de la simulation d'un ressort de raideur  $K$

Nous pouvons comparer cette fréquence avec la fréquence obtenue en utilisant la formule 5.59.

Dans le cas de ce modèle du ressort, nous avons fixé  $K = 1$ . Sachant que  $k = \alpha\beta K$ , nous avons  $k = 1844.2$ . Avec cette valeur de  $k$  et la valeur de la masse du complexe touche-tranche  $m = 347gr$  retrouvée précédemment, nous trouvons une fréquence de  $11.60Hz$ , très proche de celle trouvée graphiquement à  $11.90Hz$ .

Cette fréquence peut également être comparé avec celle obtenue lors du test de mesure de la raideur réelle. Avec les valeurs obtenues pour la raideur équivalente réelle  $k$  et pour la masse du complexe touche-tranche, nous pouvons calculer une fréquence de  $12.09Hz$ .

Dans les trois cas, les fréquences obtenues sont très proches de  $12Hz$ , ce qui nous permet de valider les mesures effectuées.

## 5 Analyse du frottement sec

Le frottement sec est inhérent aux systèmes mécaniques. Dans un système fait à partir de l'assemblage de plusieurs pièces il est quasiment inévitable.

Il existe dans tous les systèmes mécaniques classiques, cependant, dans l'haptique il a une importance particulière puisque la perception tactile et kinesthésique sont très importantes.

Nous avons donc réalisé des acquisitions permettant d'observer le frottement sec des touches du TGR.

La méthode consiste à faire une commande en position du TGR comme montré dans la Figure 5.33.

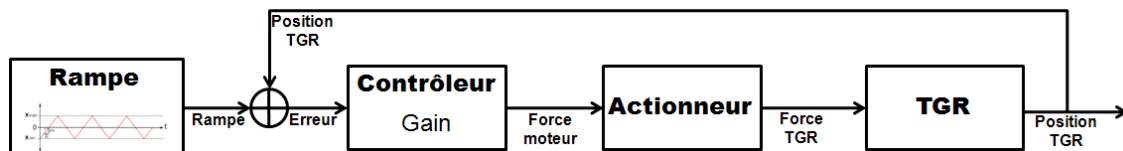


FIGURE 5.33 – Commande en position pour le test du frottement sec

La position du TGR est commandée par un signal triangulaire (Figure 5.34) modélisé dans le simulateur. Ce signal commandera la position de la touche du TGR qui fera un mouvement vertical de haut en bas.

La force envoyée au TGR est proportionnelle à la différence entre le signal triangulaire et la position de la touche mesurée par les capteurs de position.

Nous avons implanté un modèle permettant la modification des paramètres de la fonction triangle comme sa pente, sa valeur minimale et sa valeur maximale, ainsi que le Gain du contrôleur. Ces paramètres sont définis dans le fichier des paramètres du modèle.

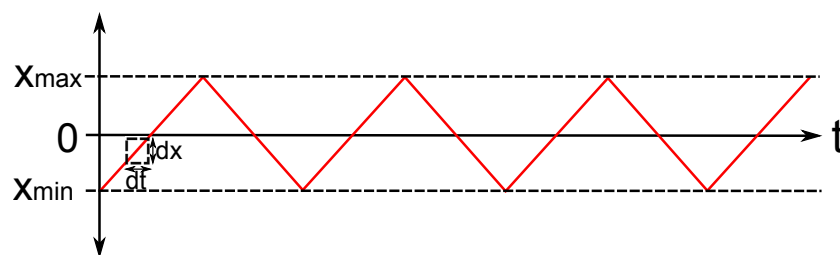
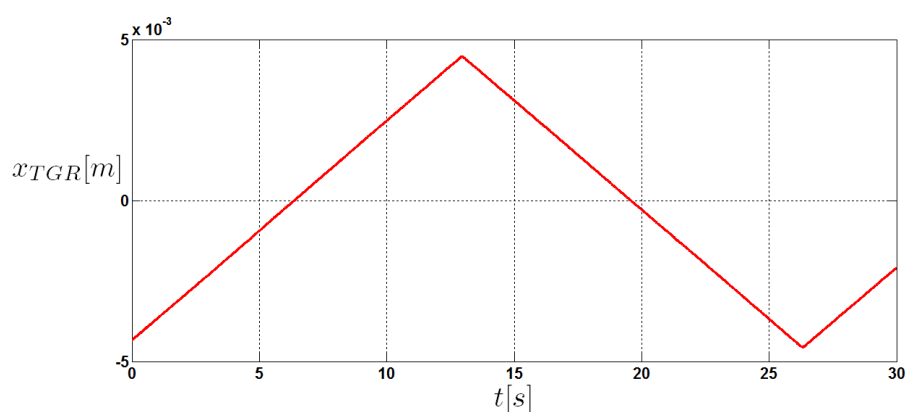


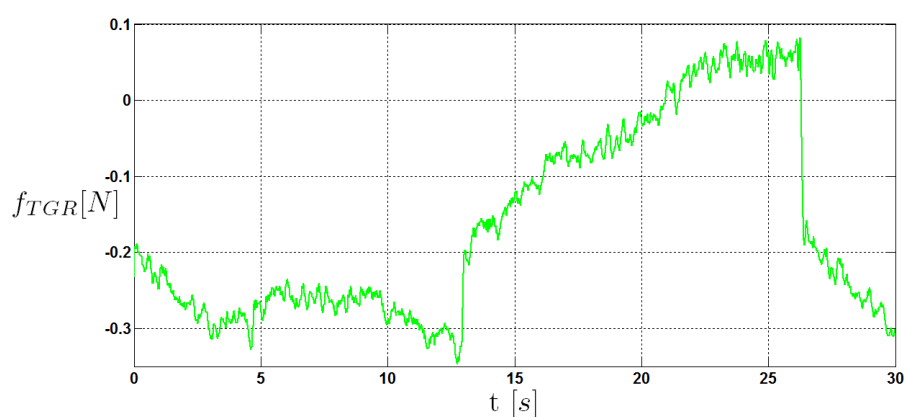
FIGURE 5.34 – Définition de la consigne de position

Nous avons effectué des simulations de ce modèle durant lesquelles nous avons acquis des données de position et de force. Nous analysons des déplacements lents de la touche.

La Figure 5.35 montre la position du TGR,  $x_{TGR}$ , lors d'un mouvement de fréquence  $0.04Hz$ . Nous pouvons observer que le TGR suit la position de la consigne donnée par la fonction triangulaire 5.34.

FIGURE 5.35 – Position du TGR,  $x_{TGR}$ 

La Figure 5.36 montre la force du TGR,  $f_{TGR}$ , correspondante.

FIGURE 5.36 – Force du TGR,  $f_{TGR}$ 

La Figure 5.37 montre la courbe force  $f_{TGR}$  vs. position  $x_{TGR}$  du TGR lors d'un mouvement de la touche à  $0.04Hz$ .

Nous avons fait de mesures en variant la période de la fonction triangle donnée comme consigne (augmentant ou diminuant la vitesse d'oscillation de la touche). Nous observons que la position de la touche suit toujours la consigne donnée par la fonction triangulaire. Les courbes force  $f_{TGR}$  vs. position  $x_{TGR}$  du TGR lors des mouvements de la touche à  $0.03Hz$  et  $0.06Hz$  sont également montrées dans la Figure 5.37.

Nous observons des courbes force vs. position similaires pour les différentes mesures. Grâce à ces courbes, nous pouvons observer les variations de la force, notamment aux points de collage et de décolage de la touche ( $x_{max}$  et  $x_{min}$ ). Nous attribuons ces variations à la présence d'un frottement sec dans la touche. Si la force de frottement n'existait pas, cette courbe serait linéaire horizontalement et réversible c'est à dire utilisant le même chemin aller et retour.

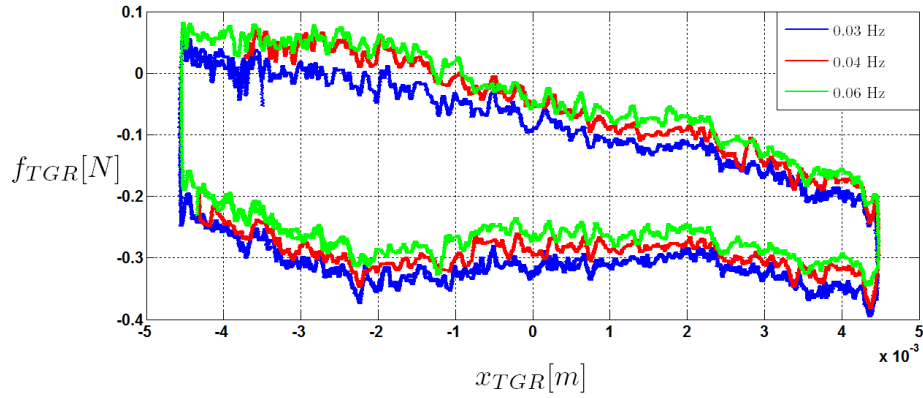


FIGURE 5.37 – Force du TGR,  $f_{TGR}$  vs. Position du TGR,  $x_{TGR}$

Nous observons un frottement sec de l'ordre de  $0.1N$ . Il correspond à l'ensemble de frottements secs générés par les éléments mécaniques de la tranche ramenés au niveau de l'axe moteur (Point A) (voir Figure 5.31). Le même frottement ramené au point de manipulation (Point B) est de  $0.04N$ , environ  $4gf$ . Bien que les effets de ce frottement sec soient perceptibles, nous considérerons que ce niveau de frottement est acceptable pour les mesures qui nous intéressent.

Ce frottement peut être dû à la sensibilité du dispositif aux conditions externes de température, au niveau de sollicitation de la bobine ou à d'autres facteurs non mesurables. Il peut également avoir une relation avec la sensibilité du dispositif modulaire aux efforts latéraux [Florens, 2008].

## 6 Définition d'un filtre dans le DSP

Les premières acquisitions que nous avons effectuées, ont mis en évidence des signaux très bruités. Afin de récupérer des signaux moins bruités, nous avons réalisé un filtrage des signaux directement dans la simulation. Nous avons alors implanté un filtre passe-bas dans le processus simulation.

La fonction de transfert du filtre de premier ordre est définie par :

$$F(Z) = \frac{S(z)}{E(z)} = \frac{b}{z - a} \quad (5.61)$$

où les coefficients  $a$  et  $b$  sont réels.

Le gain statique  $G$  est défini par :

$$G = \frac{b}{1 - a} \quad (5.62)$$

Nous pouvons donc déduire le coefficient  $b$  :

$$b = G(1 - a) \quad (5.63)$$

Quant à son pôle en  $z$ ,  $a$ , il peut être défini en fonction de la période d'échantillonnage  $T_e$  et de la fréquence de coupure du filtre  $f_c$  :

$$a = e^{-2\pi f_c T_e} = e^{-\omega_c T_e} \quad (5.64)$$

Nos simulations sont effectuées sur la plateforme temps réel en fixant la fréquence d'échantillonnage à  $F_e = 10kHz$ .

Ce filtre peut ainsi être mis en œuvre comme suit :

$$S_n = aS_{n-1} + bS_{n-1} \quad (5.65)$$

Pour l'implantation de ce filtre sur la plateforme temps réel, nous devons définir ses paramètres : son ordre, sa fréquence de coupure, ses pôles et son gain. Pour une meilleure utilisation de ce filtre, ces paramètres ont été intégrés dans le fichier de configuration (.mdl) contenant également ceux du modèle. A partir de ce fichier, nous pouvons facilement les modifier.

## 7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description de la plateforme temps réel ERGON\_X et l'évolution de ce dispositif jusqu'à sa version d'aujourd'hui. Nous avons décrit les modifications et les mesures effectuées sur la plateforme afin d'aboutir à un dispositif complet pour l'analyse expérimentale du couplage en situation de simulation haptique. La mise en œuvre de ce dispositif implique un travail technique très important pour prendre en main la totalité de la plateforme en allant de l'électronique au logiciel.

Notre rôle ne s'est pas limité à celui d'un simple utilisateur de ce type de plateforme mais aussi à celui d'un concepteur. En effet, nous avons activement participé au développement de la console Gamma à 12 degrés de liberté. Nous avons ainsi acquis une expertise dans la conception de nouvelles cartes électroniques : des cartes capteurs pour récupérer les signaux issus des capteurs du dispositif haptique, des cartes de puissance pour traiter les forces renvoyées par le simulateur en direction du dispositif haptique et des cartes de liaisons entre les différents composants du simulateur.

La plateforme ERGON\_X avec les modifications que nous lui avons apportées, a été utilisée pour l'acquisition de données du couplage en situation de simulation haptique (position et force) lors des expériences qui seront présentées dans le Chapitre 6. Nous avons également retrouvé les équivalences entre les paramètres réels et virtuels. Ces équivalences nous permettront de trouver une signification physique aux données acquises lors de la simulation et aux paramètres simulés et de comparer les simulations effectuées sur la plateforme temps réel avec les simulations effectuées à l'aide de l'outil MATLAB.



## Chapitre 6

# Analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>134</b>
<b>2</b>	<b>Analyse du modèle auto-entretenu</b>	<b>134</b>
2.1	Simulation Matlab du modèle auto-entretenu	135
2.2	Simulation sur la plateforme temps réel du modèle auto-entretenu	136
2.3	Résultats	136
<b>3</b>	<b>Validation de la méthode d'identification des paramètres à partir de données réelles et caractérisation du TGR</b>	<b>137</b>
3.1	Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 1	140
3.2	Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 2	142
3.3	Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 3	142
<b>4</b>	<b>Analyse expérimentale du couplage homme-système haptique pour des gestes périodiques</b>	<b>143</b>
4.1	Le modèle de Van der Pol comme un générateur de gestes périodiques	143
4.2	Protocole expérimental	144
4.3	Résultats	145
4.4	Analyse du geste passif en utilisant un objet virtuel actif	147
4.5	Protocole Expérimental	147
4.6	Mesures préliminaires du geste passif	149
4.7	Identification des composantes passives du geste	150
4.8	Analyse générale	154
<b>5</b>	<b>Proposition d'un nouveau protocole expérimental</b>	<b>155</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>156</b>

---



## 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les expériences réalisées sur le couplage en situation de simulation haptique. Ces expériences permettront de caractériser les modèles que nous avons définis dans le Chapitre 4.

Dans un premier temps, dans la Section 2, nous présentons une comparaison des simulations Matlab effectuées à partir du modèle auto-entretenu décrit dans le Chapitre 4 avec des simulations temps réel réalisées après l'implantation de ce modèle sur la plateforme temps réel. Nous effectuons également une comparaison de ces simulations afin de valider le protocole de l'acquisition des données ainsi que les équivalences entre les signaux et les paramètres réels et virtuels proposés dans le Chapitre 5.

Dans un second temps, dans la Section 3, nous proposons une caractérisation du TGR par identification de ses paramètres en utilisant le modèle auto-entretenu défini dans le Chapitre 4. Cette caractérisation constitue une première validation de la méthode d'identification des paramètres utilisée.

Enfin, nous présentons une analyse expérimentale du couplage en situation de simulation haptique. Pour cela, nous utilisons, d'une part, le modèle basé sur l'équation de Van der Pol comme un générateur de gestes périodiques (Section 4.1) et d'autre part, le modèle auto-entretenu pour l'analyse du geste passif (Section 4.4).

## 2 Analyse du modèle auto-entretenu

Avant d'utiliser les données récupérées sur la plateforme temps réel en utilisant le protocole d'acquisition pour l'analyse du couplage et donc l'identification de ses paramètres, nous comparons les signaux acquis lors de la simulation d'un modèle sur la plateforme temps réel avec les signaux obtenus lors de la simulation Matlab.

Le modèle dont nous allons comparer les résultats est le modèle auto-entenu, décrit dans la Section 2.2 du Chapitre 4. Ce modèle a été implanté sur la plateforme temps réel suivant le formalisme Cordis Anima et sera utilisé pour l'analyse du geste passif. Dans un premier temps, nous réalisons une acquisition des signaux lors de la simulation de ce modèle pour un groupe de paramètres donné, faisant osciller la touche. Nous comparons ensuite ces signaux avec les résultats de la simulation du même modèle effectuée sur MATLAB pour des paramètres équivalents comme décrit dans le Chapitre 4. Les résultats de cette analyse nous permettront de valider le dispositif d'acquisition ainsi que les équivalences entre les paramètres réels et virtuels.

A partir de l'équation (4.12), le modèle à simuler est décrit par :

$$m_{TGR}\ddot{x} + B_{OV}\dot{x} + K_{OV}x - F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{v_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{v_0}\right)^2} = 0 \quad (6.1)$$

Pour la simulation temps réel de ce modèle, nous avons choisi d'utiliser les paramètres virtuels définis dans le Tableau 6.1. Avant de réaliser les simulations sur MATLAB, nous devons retrouver les paramètres réels équivalents aux paramètres virtuels introduits dans le simulateur. Ces paramètres équivalents sont calculés à partir des relations générales établies entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs virtuelles, résumées dans le Tableau 5.2. Les paramètres réels équivalents calculés pour la simulation du modèle auto-oscillant sur Matlab sont également montrés dans le Tableau 6.1.

Paramètre	Valeur Virtuelle	Valeur Réelle	Unités réelles
$B_{OV}$	100	9.2208	$Ns^2/m$
$K_{OV}$	1	922.0770	$N/m$
$F_0$	$20 \cdot 10^{-3}$	2.1016	$N$
$v_0$	$7 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$	$m/s^2$

TABLEAU 6.1 – Valeurs virtuelles et leurs équivalences réelles des paramètres pour la simulation du modèle auto-entretenu avec  $\alpha = 8.775$  et  $\beta = 105.08$

## 2.1 Simulation Matlab du modèle auto-entretenu

Pour effectuer cette simulation nous réalisons sur Matlab/Simulink, une implantation du modèle auto-oscillant. Nous utilisons les paramètres réels équivalents montrés dans le Tableau 6.1.

De plus, nous considérons la masse du TGR  $m_{TGR}$  à 340gr c'est à dire à environ la masse du complexe touche-tranche.

A partir des résultats de cette simulation, nous récupérons les données de position  $x_s$  et de force  $f_s$ . Les signaux obtenus sont respectivement montrés dans les Figures 6.1 et 6.2.

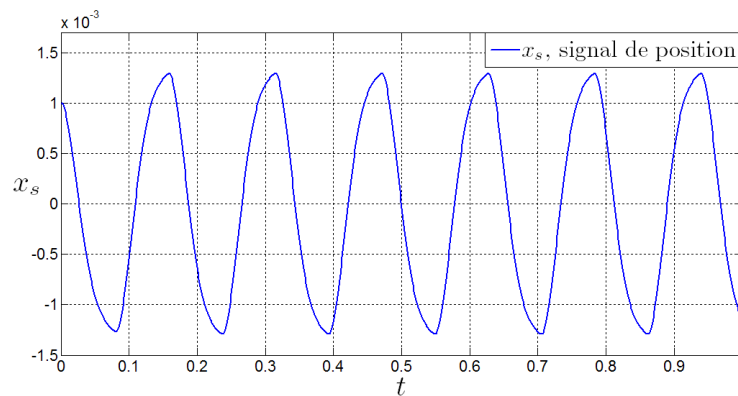


FIGURE 6.1 – Signal de position  $x_s$  obtenu lors de la simulation Matlab/Simulink avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1

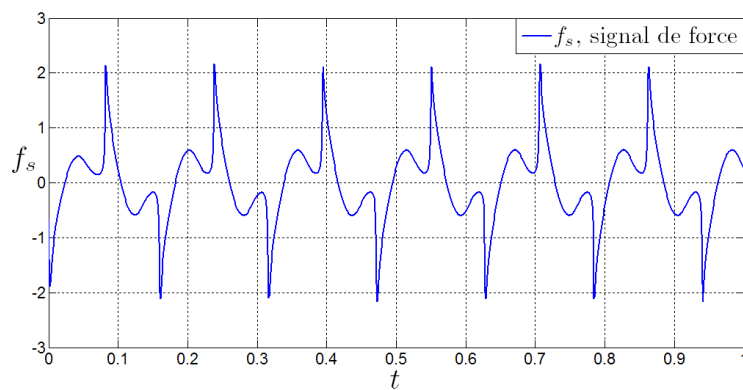


FIGURE 6.2 – Signal de force  $f_s$  obtenu lors de la simulation Matlab/Simulink avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1

## 2.2 Simulation sur la plateforme temps réel du modèle auto-entrenu

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le modèle auto-entrenu est implanté sur la plateforme temps réel suivant le formalisme Cordis Anima. Nous effectuons ensuite une simulation de ce modèle avec les paramètres virtuels définis dans le Tableau 6.1. Le TGR est alors lié au modèle implanté sur le simulateur. Lors de la simulation, nous effectuons une acquisition des données de position  $X$  et de force  $F$ , en utilisant le protocole d'acquisition implanté sur la plateforme, comme décrit dans la Section 3 du Chapitre 5.

Les signaux enregistrés sont ensuite lus et affichés en utilisant Matlab.

Pour pouvoir comparer ces signaux avec ceux issus de la simulation Matlab, nous devons trouver la position  $x_r$  et la force  $f_r$  réelles à partir des données de position  $X$  et de force  $F$  virtuelles acquises lors de la simulation sur la plateforme temps réel, selon les équivalences proposées dans le Chapitre 5.

La position et la force réelles,  $x_r$  et  $f_r$ , peuvent être calculées suivant la relation (5.25) :

$$\begin{cases} x_r = \frac{X}{\alpha} \\ f_r = \beta F \end{cases} \quad (6.2)$$

Nous pouvons ainsi afficher les courbes de la position  $x_r$  (Figure 6.3) et de la force  $f_r$  (Figure 6.4) correspondant aux données issues du simulateur dans le monde réel et les comparer avec les courbes de position  $x_s$  (Figure 6.1) et de force  $f_s$  (Figure 6.2) issues de la simulation Matlab.

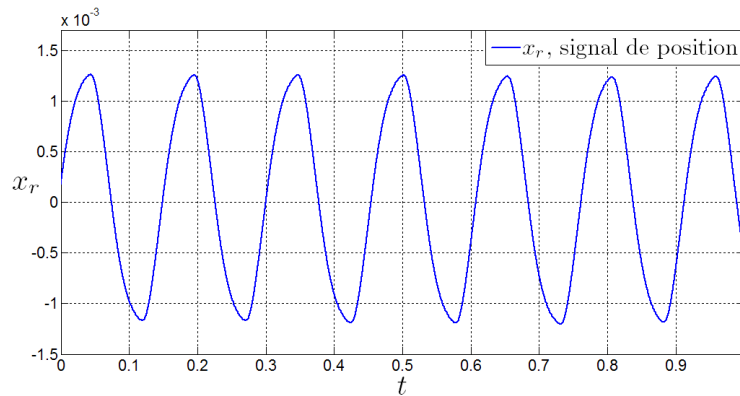


FIGURE 6.3 – Signal de position  $x_r$  obtenu lors de la simulation temps réel avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1

## 2.3 Résultats

Pour le groupe de paramètres déterminés dans le Tableau 6.1, ainsi que pour d'autres groupes de paramètres provoquant un comportement auto-oscillant de la touche du TGR et en considérant la masse du TGR  $m_{TGR}$  à une valeur de  $340gr$ , nous pouvons observer lors de la simulation sur Matlab et lors de la simulation temps réel, que nous obtenons des courbes de position et de force en fonction du temps très similaires du point de vue de l'allure, de l'amplitude et de la fréquence. Nous remarquons des oscillations de la position autour de  $\pm 1.25mm$ . Nous observons également que la force varie entre  $\pm 2N$  et que la fréquence d'oscillation est d'environ  $6.5Hz$ . Ces résultats montrent la cohérence des relations d'équivalence décrites dans le Tableau 5.2 ainsi que la validité des gains de position  $\alpha$  et de force  $\beta$  trouvés pour ce simulateur. Nous pouvons ainsi valider le protocole d'acquisition des données et les équivalences entre les signaux et les paramètres réels et virtuels proposés dans le Chapitre 5.

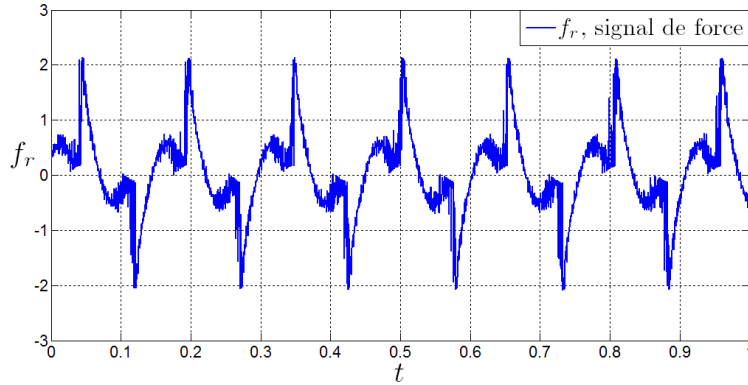


FIGURE 6.4 – Signal de force  $f_r$  obtenu lors de la simulation temps réel avec les paramètres définis dans le Tableau 6.1

### 3 Validation de la méthode d'identification des paramètres à partir de données réelles et caractérisation du TGR

Une expérience préliminaire, concernant la caractérisation du TGR ou l'étalonnage dynamique, a été effectuée pour vérifier les paramètres, notamment la masse du TGR mais principalement pour valider la méthode d'identification des paramètres décrite dans le Chapitre 4 à partir de données réelles acquises lors de la simulation haptique.

Pour réaliser cette caractérisation, nous utilisons le modèle auto-entretenu, représentant un objet virtuel faisant osciller la touche du TGR, proposé dans le Chapitre 4 et donné par l'équation (4.12). Nous pouvons rappeler ce modèle ci-dessous :

$$m_{TGR}\ddot{x} + (b_{TGR} + B_{OV})\dot{x} + K_{OV}x - F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{V_0}\right)^2} = 0 \quad (6.3)$$

Ce modèle se compose de deux parties :

- Une première partie composée de l'objet virtuel. Celui-ci est composé à la fois d'une partie active donnée par les paramètres  $F_0$  et  $V_0$  et d'une partie passive donnée par les paramètres  $K_{OV}$  et  $B_{OV}$ . Cet objet virtuel est implanté sur le simulateur temps réel et provoque des oscillations de la tranche du TGR pendant la simulation.
- Une deuxième partie composée du TGR qui oscille suivant le modèle auto-entretenu implanté sur la plateforme. Les paramètres du TGR sont principalement sa masse  $m_{TGR}$  et éventuellement sa viscosité  $b_{TGR}$  dont nous analyserons l'existence.

A partir du modèle décrit par (6.3) représentant le système objet virtuel-TGR, nous cherchons à estimer les paramètres du TGR à partir des données acquises lors de la simulation de l'objet virtuel auto-oscillant, en utilisant une méthode d'identification des paramètres. Pour cela, nous allons utiliser la méthode des moindres carrés.

Afin de définir le vecteur des mesures  $\phi$  et le vecteur des paramètres correspondant, nous considérons connus tous les paramètres de l'objet virtuel passif  $K_{OV}$  et  $B_{OV}$  ainsi que les paramètres de l'objet virtuel actif  $F_0$  et  $V_0$ . Ces paramètres sont spécifiés dans le fichier de configuration des paramètres du modèle, enregistré préalablement dans le simulateur.

Les paramètres restant à identifier sont alors :

- La masse  $m_{TGR}$  d'une tranche mobile du dispositif haptique TGR.
- La viscosité  $b_{TGR}$  d'une tranche mobile du dispositif haptique TGR.

Pour identifier ces paramètres en utilisant la méthode des moindres carrés, nous utilisons une variante de la méthode décrite dans la section 4.1 du Chapitre 4 pour l'identification des paramètres avec les données issues de la simulation Matlab.

A partir de l'équation (6.3), nous pouvons définir la variable observée  $y$  par :

$$y = -K_{OV}x + F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{V_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{V_0}\right)^2} \quad (6.4)$$

Le vecteur des mesures  $\phi(t)$  et le vecteur des paramètres  $\theta$  sont alors définis par :

$$\phi(t) = (\ddot{x}, \dot{x}) \quad (6.5)$$

$$\theta = (m_{TGR}, (b_{TGR} + B_{OV})) \quad (6.6)$$

A partir de (6.6), nous pouvons définir la viscosité totale  $b_T$  suivante :

$$b_T = b_{TGR} + B_{OV} \quad (6.7)$$

Le vecteur  $\theta$  peut alors être exprimé comme suit :

$$\theta = (m_{TGR}, b_T) \quad (6.8)$$

Ce vecteur des paramètres nous permet d'identifier la masse  $m_{TGR}$  et éventuellement la viscosité  $b_{TGR}$  de la tranche du TGR.

Pour ces expériences, nous utilisons un dispositif à 4 tranches sans aucun manipulateur supplémentaire (touche ou stick). Le poids de la tranche seule est d'environ 300gr.

Afin d'identifier les paramètres  $m_{TGR}$  et  $b_{TGR}$  du dispositif haptique, nous réalisons des mesures de la position de la touche lors de la simulation. Afin de comparer, de vérifier et de valider les résultats obtenus lors de l'identification des paramètres, nous réalisons trois mesures différentes en variant à chaque fois la masse du système. Pour cela, nous ajoutons à chaque fois une masse supplémentaire à la touche. Cette masse est placée au point A, comme défini dans la Figure 5.30.

Les trois mesures que nous effectuons sont définies dans le Tableau 6.2.

Dans ce tableau, la masse totale  $m_T$  est définie comme la somme de la masse de la tranche du TGR  $m_{TGR}$  et de la masse ajoutée  $m_A$  pour la mesure :

$$m_T = m_{TGR} + m_A \quad (6.9)$$

Mesure	Description
1	Acquisition de la position de la touche du TGR oscillant sans une masse additionnelle
2	Acquisition de la position de la touche du TGR oscillant avec une masse supplémentaire $m_A = 50gr$
3	Acquisition de la position de la touche du TGR oscillant avec une masse supplémentaire de $m_A = 100gr$

TABLEAU 6.2 – Description des mesures effectuées pour la caractérisation du TGR

A partir de (6.7) et (6.9), le vecteur des paramètres  $\theta$  à identifier (6.8) devient :

$$\theta = (m_T, b_T) \quad (6.10)$$

De la même façon que nous avons défini les mesures, nous définissons trois groupes de paramètres, en faisant varier la raideur  $K_{OV}$  et la viscosité  $B_{OV}$  de la partie passive de l'objet virtuel. Pour le premier groupe, nous choisissons une raideur  $K_{OV}$  et une viscosité  $B_{OV}$  de l'objet virtuel. Pour le deuxième groupe, nous choisissons une raideur  $K_{OV}$  et une viscosité  $B_{OV}/2$  alors que pour le dernier groupe, une raideur  $2K_{OV}$  et une viscosité  $B_{OV}$ . Ces trois groupes de paramètres sont définis dans le Tableau 6.3 ainsi que leurs équivalents réels pour  $\alpha = 10$  et  $\beta = 113.5$ .

Groupe	Paramètre	Valeur Virtuelle	Valeur Réelle	Unités réelles
1	$B_{OV}$	100	11.35	$Ns^2/m$
	$K_{OV}$	1	1135	$N/m$
2	$B_{OV}$	50	5.675	$Ns^2/m$
	$K_{OV}$	1	1135	$N/m$
3	$B_{OV}$	100	11.35	$Ns^2/m$
	$K_{OV}$	2	2270	$N/m$

TABLEAU 6.3 – Valeurs virtuelles et leurs équivalences réelles des paramètres pour la simulation du modèle auto-entretenu avec  $\alpha = 10$  et  $\beta = 113.5$

Les paramètres de la partie active de l'objet virtuel sont conservés pour les trois groupes et sont montrés dans le Tableau 6.4.

Paramètre	Valeur Virtuelle	Valeur Réelle	Unités réelles
$F_0$	$20 \cdot 10^{-3}$	2.27	$N$
$v_0$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$m/s^2$

TABLEAU 6.4 – Valeurs des paramètres de la partie active de l'objet virtuel et leurs équivalences réelles pour la simulation du modèle auto-entretenu avec  $\alpha = 10$  et  $\beta = 113.5$

Les données de position utilisées pour l'identification des paramètres ont été acquises lors de la simulation temps réel de l'objet virtuel décrit par (4.9), en utilisant à chaque fois l'un des groupes de paramètres défini précédemment.

La vitesse  $\dot{x}$  et l'accélération  $\ddot{x}$  nécessaires pour construire le vecteur des mesures  $\phi(t)$  défini par (6.5), sont calculées à partir des données de position acquises  $x$ , en utilisant une méthode de différenciation numérique : la méthode de la différence centrale décrite dans la Section 3.1.2.1 du Chapitre 4.

Cependant, ces données de position  $x$  sont bruitées. Comme observé dans le Chapitre 4, ce bruit présent dans le signal s'amplifie pour la première et la deuxième dérivée et rend difficile l'estimation des paramètres. Nous devons alors filtrer le signal bruité pour contrôler la rapport signal sur bruit. Les données de position ont été filtrées en utilisant un filtre passe-bas. Il s'agit d'un filtre Butterworth numérique aller-retour non causal de phase zéro. C'est à partir de ce signal de position filtré que nous calculons la vitesse  $\dot{x}$  et l'accélération  $\ddot{x}$ .

Le signal de position provenant du simulateur temps réel et son signal filtré sont montrés dans la Figure 6.5 pour la Mesure 2 c'est à dire avec  $m_T = 350gr$  et pour le Groupe 1 de paramètres. Les signaux de vitesse et d'accélération obtenus par une simple et une double dérivations du signal de position filtré pour cette même mesure sont respectivement montrés dans les Figures 6.6 et 6.7.

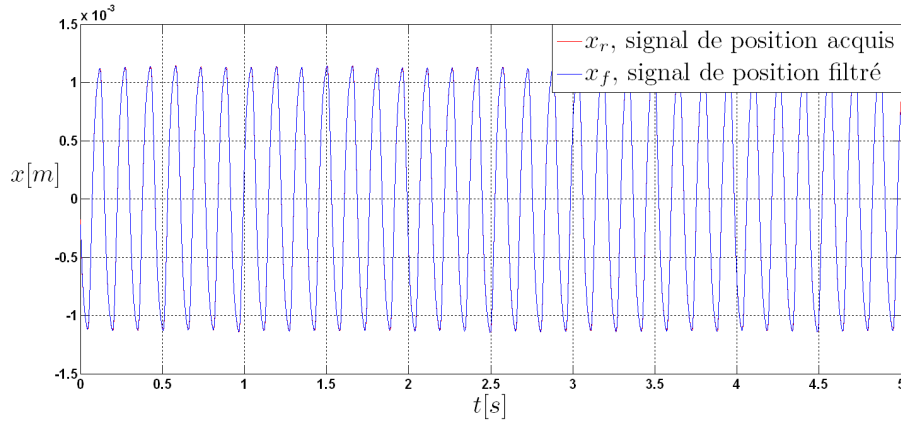


FIGURE 6.5 – Signal de position acquis et son signal filtré pour la Mesure 2 et pour le Groupe 1 de paramètres

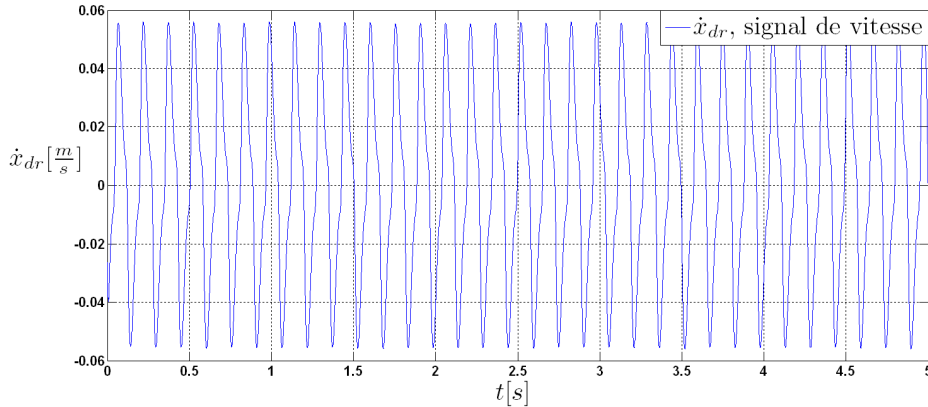


FIGURE 6.6 – Signal de vitesse obtenu par une simple dérivation du signal de position filtré pour la Mesure 2 et pour le Groupe 1 de paramètres

### 3.1 Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 1

Les résultats obtenus pour l'estimation de la masse totale  $\hat{m}_T$  avec le Groupe 1 de paramètres et son erreur d'estimation sont montrés dans le Tableau 6.5.

Nous observons que les valeurs de la masse totale estimée  $\hat{m}_T$  sont proches des valeurs attendus c'est à

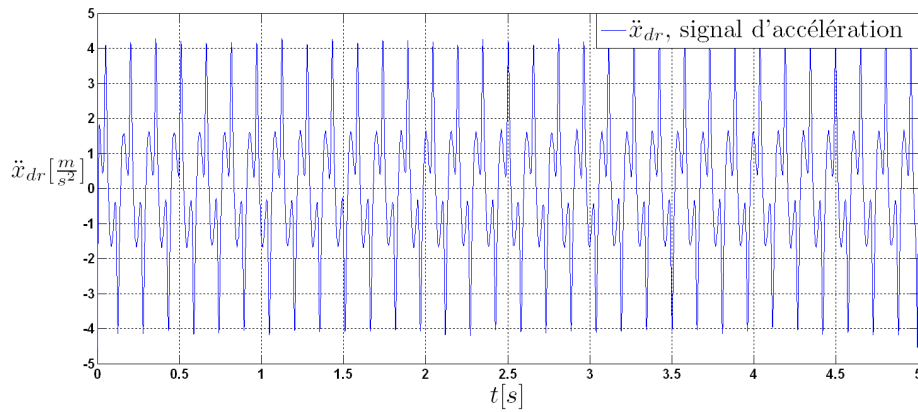


FIGURE 6.7 – Signal d'accélération obtenu par une double dérivation du signal de position filtré pour la Mesure 2 et pour le Groupe 1 de paramètres

Mesure	Masses ajoutée $m_A$ (Kg)	Masses Totale $m_T$ (Kg)	Masses Totale Estimée $\hat{m}_T$ (Kg)	Erreur Relative $Er$ (%)
1	0	0.300	0.309	3.06
2	0.050	0.350	0.347	0.95
3	0.100	0.400	0.408	2.09

TABLEAU 6.5 – Résultats de l'identification de la masse totale  $\hat{m}_T$  avec le Groupe 1 de paramètres ( $k = 1135$  et  $b = 11.35$ )

dire de la masse du TGR  $m_{TGR}$  et de la masse ajoutée à chaque mesure  $m_A$ , avec des erreurs relatives inférieures à 3%.

Les résultats obtenus pour l'estimation de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le Groupe 1 de paramètres et ses erreurs relatives sont montrés dans le Tableau 6.6. Nous observons l'estimation de la viscosité du TGR  $\hat{b}_{TGR}$  pour chacune des trois mesures réalisées.

Mesure	Masses ajoutée $m_A$ (Kg)	Masses Totale $m_T$ (Kg)	Viscosité Totale Estimée $\hat{b}_T$ (Ns/m)	Erreur Relative $Er$ (%)
1	0	0.300	11.561	1.86
2	0.050	0.350	11.634	2.50
3	0.100	0.400	11.359	0.08

TABLEAU 6.6 – Résultats de l'identification de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le Groupe 1 de paramètres ( $k = 1135$  et  $b = 11.35$ )

En comparant l'estimation de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le paramètre simulé  $B_{OV}$  défini dans le Tableau 6.3 pour le Groupe 1, nous notons que les erreurs relatives entre les deux valeurs sont inférieures à 2.50% pour les trois mesures. A partir de (6.7) et aux vues des erreurs relatives pour l'estimation de la viscosité totale  $b_T$ , nous pouvons considérer la viscosité du TGR  $\hat{b}_{TGR}$  négligeable. En effet, la différence entre  $b_T$  et  $B_{OV}$  est dans la plage des erreurs relatives de la méthode d'identification.



### 3.2 Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 2

Les résultats obtenus pour l'estimation de la masse totale  $\hat{m}_T$  avec le Groupe 2 de paramètres et son erreur d'estimation sont montrés dans le Tableau 6.7.

Mesure	Masse ajoutée $m_A$ (Kg)	Masse Totale $m_T$ (Kg)	Masse Totale Estimée $\hat{m}_T$ (Kg)	Erreur Relative $Er$ (%)
1	0	0.300	0.298	0.34
2	0.050	0.350	0.356	1.72
3	0.100	0.400	0.403	0.73

TABLEAU 6.7 – Résultats de l'identification de la masse totale  $\hat{m}_T$  avec le Groupe 2 de paramètres ( $k = 1135$  et  $b = 5.675$ )

Nous observons que les valeurs de la masse totale estimée  $\hat{m}_T$  restent proches des valeurs réelles, avec des erreurs relatives inférieures à 1.72%.

Les résultats obtenus pour l'estimation de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le Groupe 2 de paramètres et ses erreurs relatives sont montrés dans le Tableau 6.8.

Mesure	Masse ajoutée $m_A$ (Kg)	Masse Totale $m_T$ (Kg)	Viscosité Totale Estimée $\hat{b}_T$ (Ns/m)	Erreur Relative $Er$ (%)
1	0	0.300	5.365	5.46
2	0.050	0.350	5.292	6.74
3	0.100	0.400	5.290	6.78

TABLEAU 6.8 – Résultats de l'identification de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le Groupe 2 de paramètres ( $k = 1135$  et  $b = 5.675$ )

Pour l'estimation de la viscosité total  $\hat{b}_T$ , nous observons des valeurs proches de la viscosité de l'objet virtuel  $B_{OV}$ . Cependant, nous observons que dans le cas des mesures effectuées avec les paramètres du Groupe 2, les erreurs relatives augmentent par rapport à celles obtenues avec le Groupe 1, culminant jusqu'à 6.78%. Néanmoins, ces résultats restent cohérents puisque les valeurs de  $\hat{b}_T$  obtenus pour les trois mesures sont proches, de même que pour leurs erreurs relatives.

### 3.3 Résultats de l'identification avec les paramètres du Groupe 3

Les résultats obtenus pour l'estimation de la masse totale  $\hat{m}_T$  avec le Groupe 3 de paramètres et son erreur d'estimation sont montrés dans le Tableau 6.9.

Mesure	Masse ajoutée $m_A$ (Kg)	Masse Totale $m_T$ (Kg)	Masse Totale Estimée $\hat{m}_T$ (Kg)	Erreur Relative $Er$ (%)
1	0	0.300	0.301	0.35
2	0.050	0.350	0.355	1.57
3	0.100	0.400	0.406	1.58

TABLEAU 6.9 – Résultats de l'identification de la masse totale  $\hat{m}_T$  avec le Groupe 3 de paramètres ( $k = 2270$  et  $b = 11.35$ )

Nous observons, comme dans les deux cas précédents, des valeurs estimées de  $m_T$  assez proches des valeurs connues, avec des erreurs relatives inférieures à 1.58%.

Les résultats obtenus pour l'estimation de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le Groupe 3 de paramètres et ses erreurs relatives sont montrés dans le Tableau 6.10.

Mesure	Masse ajoutée $m_A$ (Kg)	Masse Totale $m_T$ (Kg)	Viscosité Totale Estimée $\hat{b}_T$ (Ns/m)	Erreur Relative $Er$ (%)
1	0	0.300	9.768	13.93
2	0.050	0.350	9.850	13.21
3	0.100	0.400	9.757	14.03

TABEAU 6.10 – Résultats de l'identification de la viscosité totale  $\hat{b}_T$  avec le Groupe 3 de paramètres ( $k = 2270$  et  $b = 11.35$ )

Dans ce cas, nous observons une augmentation considérable des erreurs relatives entre la viscosité estimée  $\hat{b}_T$  et la viscosité de l'objet virtuel  $B_{OV}$ . Cependant, ces valeurs estimées sont proches pour les trois mesures.

Ces variations peuvent être expliquées par le fait que lorsque nous modifions les paramètres du simulateur, le comportement change, notamment au niveau de la fréquence d'oscillation du TGR. Ceci peut générer sur les systèmes, des comportements différents à ceux attendus en simulation. En effet, sur certaines mesures de test préliminaires, nous avons observé de légères différences entre la fréquence de la position mesurée et celle de la position simulée sur Matlab. De plus, lorsque nous modifions ces valeurs, les correspondances entre les paramètres réels et virtuels peuvent se voir légèrement modifiées ce qui cause des différences entre les paramètres simulés et les paramètres estimés. Dans la suite, nous travaillerons en priorité avec le Groupe 1 de paramètres, dont les estimations sont plus proches des paramètres utilisés pour la simulation sur la plateforme temps-réel.

## 4 Analyse expérimentale du couplage homme-système haptique pour des gestes périodiques

### 4.1 Le modèle de Van der Pol comme un générateur de gestes périodiques

Dans le Chapitre 4, nous avons proposé le modèle de Van der Pol (4.2) comme un générateur de gestes périodiques. Nous considérons dans cette étude, qu'une situation de couplage homme-système haptique périodique peut être modélisée par ce type d'équation.

Nous décrivons dans cette section un premier cas de mesures effectuées sur le système. L'objet virtuel passif est représenté par un module REF caractérisé par une raideur  $K$  et une viscosité  $B$  liées au TGR et à un module SOL et est implanté sur le simulateur temps réel en utilisant le formalisme Cordis Anima (voir Annexe A). L'équation du modèle de l'objet virtuel est alors donnée par :

$$F = KX + B\dot{X} \quad (6.11)$$

où  $F$  est la force virtuelle et  $X$  est la position virtuelle.

Un fois le modèle implanté sur le simulateur, nous avons réalisé des mesures lorsqu'un sujet manipule un objet virtuel en saisissant la touche du TGR et en effectuant un mouvement périodique. A partir de ces mesures, nous effectuons l'identification des paramètres du modèle de Van der Pol.

## 4.2 Protocole expérimental

Pour les expériences décrites ci-dessous, nous avons utilisé la plateforme temps réel ERGON\_X. Nous avons construit un TGR à quatre tranches, suivant les caractéristiques de la gamme ERGOS décrites dans la Section 2.1.2 du Chapitre 5 et supportant différentes morphologies de manipulateur. Dans cette étude, nous avons utilisé une morphologie de touches de piano et un seul axe. Ce dispositif est présenté dans la Figure 6.8.

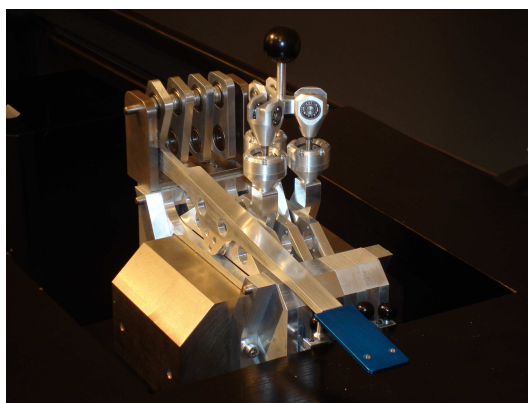


FIGURE 6.8 – Dispositif haptique utilisé pour l'expérience

Nous avons demandé aux sujets de saisir la touche du TGR en effectuant une saisie latérale puis de la bouger verticalement, de haut en bas, en exécutant un mouvement périodique linéaire et en essayant de maintenir une amplitude et une fréquence constantes à l'aide de la visualisation en temps réel de la position de la touche.

L'environnement visuel a été développé sur l'ordinateur hôte. Comme montré dans la Figure 6.9, la position de l'objet virtuel est représentée par une balle verte se déplaçant verticalement sur l'écran. Cette visualisation a été implantée afin de guider les sujets lors de la réalisation des expériences. La ligne horizontale représente la position zéro.

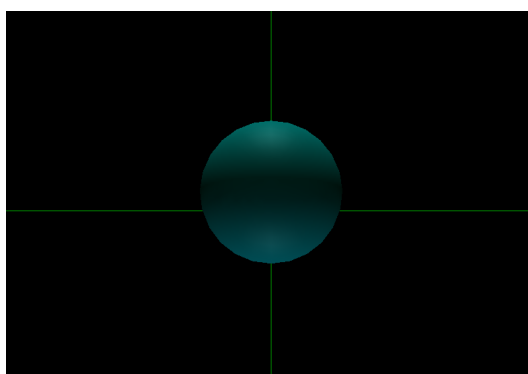


FIGURE 6.9 – Représentation visuelle de la position de l'objet virtuel

L'amplitude et la fréquence du mouvement n'ont pas été fixées, laissant ainsi le choix aux sujets. Les sujets ont exécuté la tâche proposée avec succès même si la viscosité de l'objet virtuel engendrait une dépense d'énergie importante pouvant rapidement fatiguer le sujet.

En ce qui concerne les mesures, nous avons défini trois groupes de paramètres différents pour simuler le même objet virtuel en variant ses caractéristiques, comme montré dans le Tableau 6.11. Ces trois groupes

ont une valeur fixe de la raideur  $K$  et une valeur variable de la viscosité  $B$ . Le groupe de paramètres (1a) a la valeur la plus faible de la viscosité  $B$ .

Groupe	$K$	$B$
(1a)	0.1	10
(1b)	0.1	50
(1c)	0.1	100

TABLEAU 6.11 – Groupes de paramètres définis pour l'expérience

Ces expériences nécessitent une période d'apprentissage de la part du sujet pour s'adapter au dispositif et à la réalisation du mouvement demandé. Nous réalisons ensuite une session durant laquelle il réalise la tâche avec l'objet virtuel selon les trois groupes de paramètres définis et nous acquérons les données.

Nous avons réalisé l'acquisition de données de position lors de simulations à une fréquence de  $10kHz$ , en utilisant le protocole décrit dans le Chapitre 5 qui permet de récupérer les données de position pour chaque pas de simulation. La durée d'acquisition pour chaque expérience est de 5 secondes, ce qui correspond à 50000 échantillons. Ces échantillons ont été enregistrés et sont ensuite utilisés pour l'identification des paramètres du système.

### 4.3 Résultats

Les données de position récupérées lors des expériences ont été lues et traitées à l'aide du logiciel Matlab. Dans la Figure 6.10, nous pouvons observer les données de position obtenues lors de la simulation du modèle décrit précédemment pour le groupe de paramètres (1b) défini dans le Tableau 6.11.

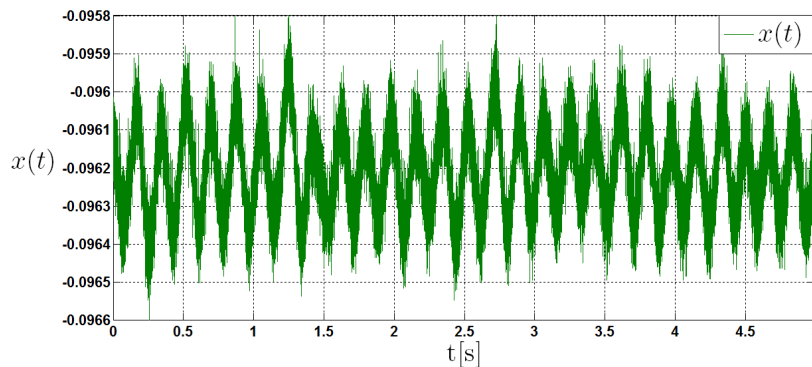


FIGURE 6.10 – Données de position obtenues : expérience (1b) avec  $K = 0.1$  et  $B = 50$

Nous remarquons que ces données initiales  $x(t)$  sont bruitées et présentent une composante continue. Elles ont donc été filtrées avec un filtre passe-haut afin de supprimer la composante continue donnant un signal  $x_1(t)$  puis avec un filtre passe-bas afin d'enlever le bruit donnant le signal  $x_2(t)$ . Ces signaux sont montrés dans la Figure 6.11.

Les deux filtres utilisés sont numériques non causaux de phase zéro c'est à dire des filtres de Butterworth aller-retour comme celui utilisé dans le Chapitre 4 pour l'identification à partir de données issues de la simulation. Le signal filtré  $x_2(t)$  est utilisé pour l'identification et est dérivé afin d'estimer la vitesse et l'accélération en utilisant l'algorithme de la différence centrale pour la différentiation. Afin d'éviter la

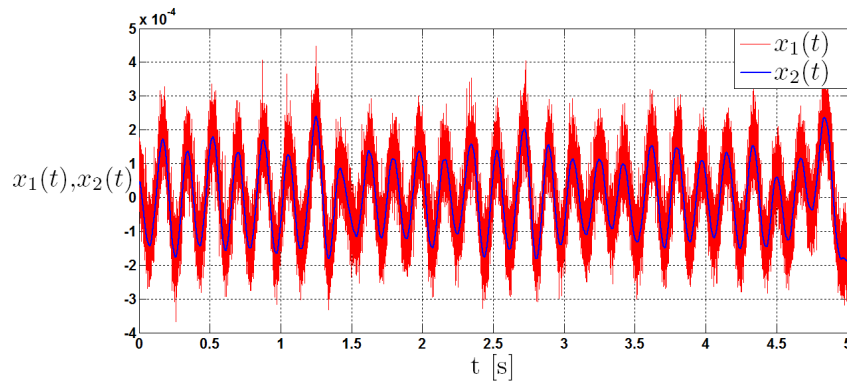


FIGURE 6.11 – Données de position filtrées obtenues : expérience (1b) avec  $K = 0.1$  et  $B = 50$

distorsion du vecteur  $\phi(t)$  (4.19), la vitesse et l'accélération ont également été filtrées après la dérivation par un filtre passe-bas. Nous pouvons maintenant identifier le vecteur des paramètres (4.20).

Une fois les paramètres estimés, nous les avons vérifié en utilisant Matlab et Simulink. Nous avons introduit ces paramètres estimés dans le modèle identifié et nous avons remarqué que le modèle a un comportement similaire à celui de l'équation de Van der Pol (4.2).

Le Tableau 6.12 montre les résultats obtenus concernant les paramètres  $\gamma_0$ ,  $x_0$  et  $\omega$  de l'équation de Van der Pol. Les valeurs obtenues de  $\gamma_0$  sont positives. Ces résultats montrent que nous sommes au delà du modèle hamiltonien et que nous sommes en train d'identifier un système dissipatif, échangeant de l'énergie. Cependant, nous n'avons pas trouvé une relation significative entre la variation du paramètre  $\gamma_0$  identifié et la variation très importante de la viscosité  $B$  de l'objet virtuel. Nous nous attendions à une variation plus significative du paramètre  $\gamma_0$ .

Groupe	$x_0$	$\gamma_0$	$\omega$
(1a)	$5.5629 \cdot 10^{-4}$	0.6722	31.9198
(1b)	$6.4887 \cdot 10^{-4}$	0.6120	35.6769
(1c)	$5.0384 \cdot 10^{-4}$	0.2771	32.5601

TABLEAU 6.12 – Résultats de l'identification des paramètres  $\gamma_0$ ,  $\omega$  et  $x_0$  pour un sujet selon les groupes de paramètres ( $K$  et  $B$ ) définis pour les expériences

Nous observons qu'en fonction des paramètres de l'objet virtuel, le paramètre  $\gamma_0$  exprimant le degré de non conservabilité du système, est différent de zéro et diminue lorsque la viscosité de l'objet virtuel augmente.

Afin de vérifier le comportement du système avec les paramètres estimés en utilisant Matlab, nous introduisons ces paramètres au modèle pour le simuler. Les données de position obtenues sont montrées dans la Figure 6.12.

Ces mesures constituent une approche préliminaire pour l'analyse du couplage main-système haptique en utilisant l'identification de paramètres.

De plus, nous avons choisi d'utiliser l'équation de Van der Pol en raison de sa simplicité. Cependant, ce modèle n'est applicable que dans le cas où des mouvements périodiques sont exécutés avec des objets très simples tels qu'un élément ressort-frottement. Cette situation fournit très peu d'informations. De futurs travaux pourraient considérer l'analyse d'autres situations périodiques, telles que le « tapping » présentant

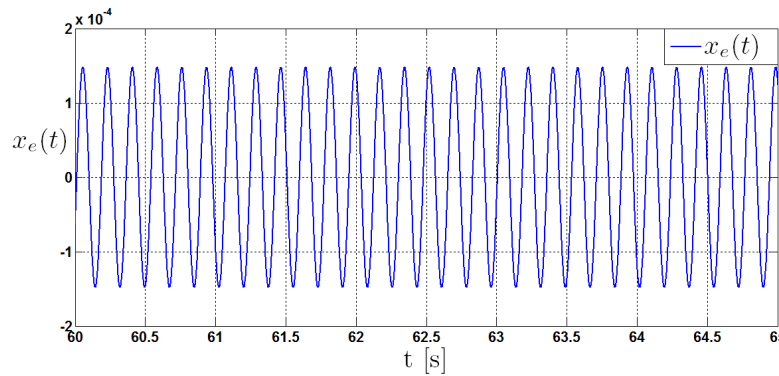


FIGURE 6.12 – Données de position obtenues en simulant le modèle sur Matlab et en utilisant les paramètres estimés lors de l'expérience (1b) avec  $K = 0.1$  et  $B = 50$

une forte charge non linéaire. Il consiste en l'action d'appliquer des percussions répétitives sur un objet ou sur une surface sonore, avec un doigt ou en utilisant un outil tel qu'un marteau. Ce type de situation devrait enrichir nos connaissances sur le système.

#### 4.4 Analyse du geste passif en utilisant un objet virtuel actif

Dans cette section, nous décrivons les expériences réalisées pour l'analyse du geste passif à partir des mesures du système couplé homme-objet virtuel. Ces expériences sont réalisées en utilisant l'objet virtuel actif décrit par (4.9). Comme nous l'avons expliqué dans la Section 2.2 du Chapitre 4, cet objet virtuel actif comporte deux parties, une partie passive représentée par un système ressort-viscosité jouant le rôle d'objet virtuel manipulé et une partie active représentée par une fonction non linéaire remplaçant l'homme en tant que générateur de mouvement. L'implémentation de ce modèle sur le simulateur haptique ERGON\_X produit un mouvement périodique oscillant de la touche du dispositif. Le mouvement est alors produit par l'objet virtuel et l'homme peut exécuter un geste passif lors du couplage.

Dans cette étude, nous pouvons réaliser des expériences sur le geste passif lors du couplage. Nous analysons les caractéristiques de ce geste passif en mesurant le système couplé homme-objet virtuel lorsqu'un sujet pose sa main sur la touche oscillante du dispositif haptique et modifie son comportement passif, en changeant son tonus musculaire sans changer de position.

Cette analyse est basée sur l'hypothèse du système couplé homme-objet virtuel considéré comme un THS.

#### 4.5 Protocole Expérimental

Pour la réalisation des expériences décrites par la suite, nous utilisons la plateforme temps réel ERGON\_X avec les modifications apportées pour l'acquisition des données, comme décrit dans le Chapitre 5. Elle est équipée d'un dispositif haptique à quatre tranches de la gamme ERGOS que nous avons construit pour les expériences (Figure 6.8) et supportant différentes morphologies. Dans ce protocole expérimental, nous utilisons une touche avec un seul axe.

Le modèle de l'objet virtuel actif, est implanté préalablement sur le simulateur suivant le formalisme Cordis Anima pour la modélisation physique (voir Annexe A). La simulation de ce modèle fait osciller la touche du TGR.

#### 4.5.1 Cas d'expérimentation

Pour les expériences sur le geste passif, nous définissons quatre cas différents. Dans le premier cas, nous demandons au sujet de mettre son index de façon relaxée sur la touche de l'interface haptique oscillant lors de la simulation du modèle de l'objet virtuel actif. Dans le deuxième cas, nous demandons au sujet de tonifier les muscles de sa main sans bouger et sans changer de position. Pour chacun de ces cas, nous avons utilisé deux configurations. Dans la première configuration, nous demandons au sujet de placer son avant bras sur la table lorsqu'il pose son doigt sur la touche du dispositif haptique. Dans la deuxième configuration, nous demandons au sujet de poser le doigt sur l'interface haptique sans aucun contact avec aucun autre support. Nous obtenons ainsi les quatre cas d'expérimentation suivant :

- Cas 1 : doigt relaxé avec support
- Cas 2 : doigt rigide avec support
- Cas 3 : doigt relaxé sans support
- Cas 4 : doigt rigide sans support

La configuration expérimentale utilisée dans les Cas 1 et 2, est montrée dans la Figure 6.13.

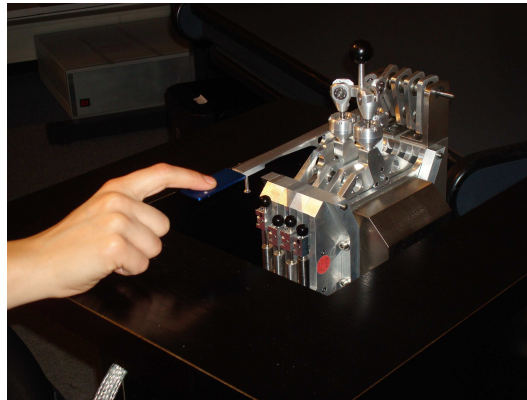


FIGURE 6.13 – Configuration expérimentale pour les Cas 1 et 2

Lors des expériences sur le geste passif, nous avons simulé l'objet virtuel actif (4.9) à une fréquence de  $10kHz$ . De plus, nous avons utilisé le protocole d'acquisition des données pour enregistrer les données de position et de force à chaque pas de simulation durant 5 secondes, ce qui correspond à 50000 échantillons pour chaque expérience. Ces données sont ensuite utilisées pour l'analyse des expériences et pour caractériser le modèle décrit par (4.15), composé d'une première partie représentée par les paramètres de l'objet virtuel actif, d'une deuxième partie représentée par les paramètres du dispositif haptique et d'une troisième partie représentée par les paramètres de l'homme, comme défini dans la Section 2.4 du Chapitre 4. Ce modèle représente le couplage homme-système haptique-objet virtuel et nous l'utiliserons pour l'analyse du geste passif.

#### 4.5.2 Compensation de la force exercée par la main

Lors des premières mesures réalisées sur la plateforme temps réel pour l'analyse du geste passif, le sujet posait sa main sur le TGR et exerçait une force sur celui-ci, l'empêchant souvent d'osciller. Afin de pouvoir effectuer les expériences sur le geste passif, ainsi que les mesures dynamiques sur le TGR, nous avons modifié le code du modèle sur le DSP afin de compenser cette force appliquée et de toujours faire osciller la tranche autour de sa position zéro. Cette compensation ne modifie pas les mesures mais corrige simplement les oscillations de la touche suivant le modèle implanté autour d'une position zéro spécifiée.



Cette compensation est contrôlée par un paramètre de réglage, ajouté dans le fichier de configuration (.mdl) des paramètres du modèle.

## 4.6 Mesures préliminaires du geste passif

Nous avons effectué des mesures préliminaires afin de réaliser une analyse qualitative des effets du geste passif sur le système. Pour ces mesures, l'objet virtuel actif implanté sur le simulateur a été simulé en utilisant les paramètres du Groupe 1, définis dans le Tableau 6.3. Nous avons simulé ce modèle, provoquant un comportement auto-oscillant du dispositif haptique sur la plateforme temps réel.

Basés sur le protocole expérimental décrit dans la Section 4.5, nous avons mesuré des données de position lors des expériences pour les quatre cas définis. Les données acquises sont lues en utilisant Matlab et les courbes pour les quatre cas sont montrées dans la Figure 6.14.

La courbe bleue, appelée *Cas 0*, représente le système auto-oscillant avant le contact avec le doigt du sujet et nous sert de référence. La fréquence de référence est de  $f_{ref} = 6.8Hz$

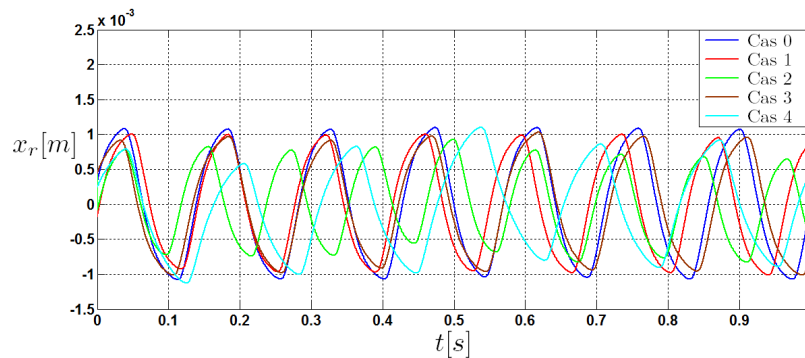


FIGURE 6.14 – Position mesurée lors de l'expérience pour les 4 cas proposés

Une analyse générale qualitative des mesures est montrée dans le Tableau 6.13. Nous y répertorions pour chacun des cas, la fréquence mesurée et sa relation avec la fréquence de référence  $f_{ref}$ . Nous observons des variations de fréquence lorsque le sujet met le doigt sur la touche du dispositif haptique et lorsqu'il change les composantes passives du geste sans bouger et sans changer de position. Le modèle proposé peut alors être utilisé comme un outil pour l'analyse du geste en utilisant une interface haptique.

CONFIGURATION		FRÉQUENCE	MODÈLE
Avec Support	Cas 1 : doigt relaxé	$7.3Hz > f_{ref}$	Le doigt représente une faible raideur
	Cas 2 : doigt rigide	$8.6Hz > f_{ref}$	Le doigt représente une raideur plus grande
Sans Support	Cas 3 : doigt relaxé	$6.75Hz < f_{ref}$	Le doigt représente une faible inertie
	Cas 4 : doigt rigide	$6Hz < f_{ref}$	Le doigt représente une inertie dominante

TABLEAU 6.13 – Analyse des mesures préliminaires

Nous notons que le doigt peut agir comme un système mécanique masse-ressort-frottement, comme décrit dans la Section 2.4 du Chapitre 4, dont sa masse ou sa raideur augmentent en fonction de la confi-



guration adoptée. Un comportement possible dans chacun des cas, est décrit dans la dernière colonne du Tableau 6.13.

Nous proposons d'évaluer l'hypothèse du système couplé homme-système haptique en utilisant le modèle proposé et en considérant la possibilité de contrôler les paramètres passives du geste. Cette méthode consiste à mesurer le système couplé lorsque le sujet modifie son comportement passif. Avec les mesures obtenues, nous pouvons caractériser le modèle défini par (4.15) en utilisant des méthodes d'identification.

#### 4.7 Identification des composantes passives du geste

A partir de l'hypothèse du THS décrite dans la Section 4.6 du Chapitre 1, nous considérons le couplage homme-objet virtuel comme un système physique temporaire. Nous considérons ce THS comme un système physique mécanique, avec des composantes passives, comme des masses, des frottements et des élasticités.

L'objectif est d'identifier les composantes passives du geste à partir des mesures acquises sur le système haptique lors de la simulation de l'objet virtuel actif décrit par (4.9) dans la Section 2.2 du Chapitre 4. Comme nous l'avons expliqué, la partie active de cet objet virtuel remplace la fonction génératrice de mouvement de l'homme. Lors de sa simulation sur la plateforme temps réel, la touche du TGR réalise des oscillations, ce mouvement est produit par l'objet virtuel et nous utilisons ce dispositif pour réaliser des expériences sur le geste passif.

Afin d'identifier les paramètres du geste lors d'une situation de couplage entre l'homme effectuant un geste passif et l'objet virtuel actif, nous avons défini dans la Section 2.4 du Chapitre 4, un modèle de geste de l'homme (4.13). Il peut être ajouté au modèle général TGR-objet virtuel défini par (4.12). Basé sur des modèles biodynamiques du système bras-main humains, nous considérons que l'homme peut être modélisé comme un système mécanique, par exemple un système masse-ressort-viscosité [Rakheja et al., 2002]. Les paramètres de l'homme peuvent alors caractérisés par sa masse  $m_H$ , sa viscosité  $b_H$  et sa raideur  $k_H$ . Nous obtenons alors le modèle général représentant le couplage *homme - système haptique - objet virtuel* décrit par (4.15). Nous rappelons ce modèle ci-dessous :

$$(m_H + m_{TGR})\ddot{x} + (b_H + b_{TGR} + B_{OV})\dot{x} + (k_H + K_{OV}x) - F_0 \frac{\frac{\dot{x}}{v_0}}{1 + \left(\frac{\dot{x}}{v_0}\right)^2} = 0 \quad (6.12)$$

Tous les paramètres du modèle général décrit dans (6.12) sont considérés connus sauf les paramètres de l'homme que nous allons estimer. L'identification des paramètres de ce modèle en utilisant la méthode des moindres carrés à partir des données issues de la simulation Matlab, a été traitée dans la Section 4 du Chapitre 4. Nous utiliserons la même méthode pour l'identification à partir de données réelles issues de la simulation temps réel.

Nous devons alors définir le vecteur des mesures  $\phi$  (4.60) et le vecteur des paramètres  $\theta$  (4.61).

Pour cela, suivant le protocole expérimental défini dans la Section 4.5, nous mesurons les données de position lors des expériences pour les quatre cas d'expérimentation.

Pour ces expériences, nous avons choisi d'utiliser le dispositif construit à quatre tranches mais sans manipulateur et de poser directement le doigt sur le point central de la tranche comme montré dans la Figure 6.15.

Comme dans le cas de la caractérisation du TGR, les expériences sont réalisées en simulant l'objet virtuel sur la plateforme temps réel pour les paramètres du Groupe 1 définis dans les Tableaux 6.3 et 6.4.



FIGURE 6.15 – Configuration expérimentale pour les Cas 1 et 2

Nous calculons ensuite les paramètres réels équivalents à partir des paramètres virtuels utilisés pour la simulation temps réel et nous calculons la position et la force réelles  $x_r$  et  $f_r$  que nous allons utiliser pour l'identification à partir des mesures acquises sur le simulateur.

A partir de la mesure de la position, nous retrouvons la vitesse et l'accélération en dérivant ce signal et nous construisons le vecteur des mesures  $\phi$  (4.60). Cependant, comme nous l'avons observé dans le Chapitre 4, le bruit présent dans le signal s'amplifie pour la première et la deuxième dérivée. Nous devons alors filtrer le signal de position acquis avec un filtre passe bas. Nous utilisons alors un filtre numérique passe-bas de Butterworth aller-retour.

De plus, même si nous avons rajouté un paramètre de compensation afin de maintenir la touche autour de sa position zéro lors des expériences, nous remarquons des composantes à basses fréquences lors de certaines mesures. Ces composantes, pouvant être dues aux mouvement involontaires du sujet lors des expériences, par exemple des tremblements dus à sa respiration, sont filtrées à l'aide d'un filtre passe haut.

Nous obtenons ainsi le signal filtré  $x_f$  et la vitesse  $\dot{x}$  et l'accélération  $\ddot{x}$  par dérivation de celui-ci, en utilisant la méthode de la différence centrale.

Enfin, une fois les signaux  $x$ ,  $\dot{x}$  et  $\ddot{x}$  définis et donc le vecteur  $\phi$  construit, nous réalisons l'identification des paramètres par la méthode des moindres carrés.

Ces expériences ont été réalisées sur 5 sujets, 3 hommes et 2 femmes entre 25 et 40 ans, sans aucun problème moteur.

#### 4.7.1 Analyse des résultats pour le Sujet 1

Les résultats d'estimation obtenus pour les paramètres globaux (4.55) et les paramètres de l'homme lors des expériences réalisées avec le Sujet 1 sont montrés dans le Tableau 6.14.

A partir de cette estimation des paramètres globaux, de (4.61) et de (4.55), comme tous les autres paramètres sont connus, nous obtenons l'estimation des paramètres de l'homme  $\hat{m}_H$ ,  $\hat{b}_H$  et  $\hat{k}_H$ .

Nous observons la variation des paramètres du geste de l'homme lorsque le sujet exécute un geste passif et modifie ses caractéristiques sans changer la position de sa main. Nous observons dans les trois premiers cas, une augmentation de la masse  $\hat{m}_T$  par rapport à  $m_{TGR}$ . Cette augmentation est de 43.9gr dans le Cas 1, 34.2gr dans le Cas 2 et 65.9gr dans le Cas 3. Dans ce dernier cas, lorsque l'homme pose

Cas	Masse Estimée		Viscosité Estimée		Raideur Estimée	
	$\hat{m}_T$ (Kg)	$\hat{m}_H$ (Kg)	$\hat{b}_T$ (Ns/m)	$\hat{b}_H$ (Ns/m)	$\hat{k}_T$ (N/m)	$\hat{k}_H$ (N/m)
1	0.3439	$43.9 \cdot 10^{-3}$	14.9371	3.5871	1586.1077	451.1077
2	0.3342	$34.2 \cdot 10^{-3}$	17.7236	6.3736	1332.6695	197.6695
3	0.3659	$65.9 \cdot 10^{-3}$	18.8020	7.4520	1693.8486	558.8486
4	0.3023	$2.3 \cdot 10^{-3}$	22.6745	11.3245	1156.2004	21.2006

TABLEAU 6.14 – Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 1

le doigt relaxé sur la touche, sans aucun support il est cohérent d'observer une masse plus importante. Dans les trois premiers cas, nous observons également des variations de la viscosité et de la raideur. La viscosité  $\hat{b}_H$  est plus élevée dans le Cas 4, avec une valeur de  $11.32 \text{Ns/m}$ .

Dans le même cas, nous remarquons également une raideur  $\hat{b}_H$  d'une valeur de  $21.20 \text{N/m}$  plus basse par rapport aux autres cas, ainsi qu'une masse totale  $\hat{m}_T$  est très proche de  $m_{TGR}$ . Dans le cas où  $m_H$  est nulle, nous pouvons considérer l'homme comme un système visco-élastique.

En ce qui concerne les raideurs, elles sont plus élevées dans le Cas 1 et le Cas 3, les deux cas où le doigt est rigide.

#### 4.7.2 Analyse des résultats pour le Sujet 2

Les résultats d'estimation obtenus pour les paramètres globaux (4.55) et les paramètres de l'homme lors des expériences réalisées avec le Sujet 2 sont montrés dans le Tableau 6.15.

Cas	Masse Estimée		Viscosité Estimée		Raideur Estimée	
	$\hat{m}_T$ (Kg)	$\hat{m}_H$ (Kg)	$\hat{b}_T$ (Ns/m)	$\hat{b}_H$ (Ns/m)	$\hat{k}_T$ (N/m)	$\hat{k}_H$ (N/m)
1	0.3870	$87.0 \cdot 10^{-3}$	13.9999	2.6499	1630.1358	495.1358
2	0.3339	$33.9 \cdot 10^{-3}$	23.3447	11.9947	1789.2967	654.2967
3	0.3641	$64.1 \cdot 10^{-3}$	15.2680	3.9180	1619.3665	484.3665
4	0.3606	$60.6 \cdot 10^{-3}$	22.4808	11.1308	1455.1792	320.1792

TABLEAU 6.15 – Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 2

Pour le sujet 2, nous observons que les valeurs de la masse totale  $\hat{m}_T$  varient par rapport à celle du TGR  $m_{TGR}$  pour les quatre Cas. Elles augmentent de  $87.0 \text{gr}$  pour le Cas 1,  $33.9 \text{gr}$  pour le Cas 2,  $64.1 \text{gr}$  pour le Cas 3 et de  $60.6 \text{gr}$  pour le Cas 4. Pour ce sujet, nous observons les masses les plus élevées lorsque le doigt est relaxé (Cas 1 et 3). Pour le Cas 1, le Sujet 2 a une masse plus élevée que tous les autres sujets. Il est le seul pour lequel nous avons trouvé la masse la plus élevée lors du Cas 1. Nous observons que les variations de la masse sont proches pour les Cas 3 et 4 (sans support). Les variations de la masse entre le Sujet 1 et le Sujet 2 sont proches pour les Cas 2 et le Cas 3.

Quant à la viscosité estimée  $\hat{b}_H$ , nous observons les valeurs les plus basses pour les Cas 1 et 3 (doigt relaxé) avec des valeurs respectives de  $2.6499 \text{Ns/m}$  et de  $3.91 \text{Ns/m}$ . Nous observons les valeurs les plus élevées pour les Cas 2 et 4 (doigt rigide) avec des valeurs de  $11.99 \text{Ns/m}$  et  $11.13 \text{Ns/m}$  respectivement. De plus, nous observons que les valeurs obtenues dans les deux cas où le doigt est rigide sont proches.

En ce qui concerne la raideur, nous observons la valeur la plus basse lors du Cas 4, comme pour le Sujet 1. De plus, nous observons des valeurs de la raideur proches dans les deux cas où le doigt est relaxé

(Cas 1 et Cas 3).

#### 4.7.3 Analyse des résultats pour le Sujet 3

Les résultats d'estimation obtenus pour les paramètres globaux (4.55) et les paramètres de l'homme lors des expériences réalisées avec le Sujet 3 sont montrés dans le Tableau 6.16.

Cas	Masse Estimée		Viscosité Estimée		Raideur Estimée	
	$\hat{m}_T$ (Kg)	$\hat{m}_H$ (Kg)	$\hat{b}_T$ (Ns/m)	$\hat{b}_H$ (Ns/m)	$\hat{k}_T$ (N/m)	$\hat{k}_H$ (N/m)
1	0.3144	$14.4 \cdot 10^{-3}$	14.9513	3.6013	1392.7082	257.7082
2	0.3006	$0.06 \cdot 10^{-3}$	20.1180	8.7680	1254.9058	119.9058
3	0.3114	$11.4 \cdot 10^{-3}$	15.0664	3.7164	1417.9609	282.9609
4	0.3192	$19.2 \cdot 10^{-3}$	19.4608	8.1108	1607.9904	472.9903

TABLEAU 6.16 – Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 3

Nous observons pour le Sujet 3, des masses estimées  $\hat{m}_T$ , variant très peu par rapport à la valeur de la masse du TGR  $m_{TGR}$ , dans les quatre cas. Pour le Cas 1, la variation est de  $14.4gr$ , pour le Cas 2 il n'y a pas de variation significative, pour le Cas 3 elle est de  $11.4gr$  et de  $19.2gr$  pour le Cas 4. Nous observons une différence avec les Sujets 1 et 2 pour lesquelles les masses variaient de façon plus significative pour les trois premiers cas.

Comme pour le Sujet 2, nous observons les viscosités estimées  $\hat{b}_H$  le plus élevées dans les Cas 2 et 4 (doigt rigide) avec des valeurs de  $8.76Ns/m$  et  $8.11Ns/m$  respectivement. Dans les Cas 1 et 3 (doigt relaxé), nous obtenons des valeurs plus basses de  $3.60Ns/m$   $3.71Ns/m$  respectivement. Nous observons que pour ce sujet les valeurs obtenues pour les deux cas avec le même comportement passif (doigt relaxé ou rigide) sont proches.

Au niveau de la raideur estimée  $\hat{k}_H$ , nous observons qu'elle est plus basse pour le Cas 2 et plus élevée pour le Cas 4 avec des valeurs de  $119.90N/m$  et  $472.99N/m$  respectivement. Comme pour le Sujet 2, nous observons des valeurs de la raideur proches dans les deux cas où le doigt est relaxé. Ces valeurs sont de  $257.70N/m$  et  $282.96N/m$  pour le Cas 1 et le Cas 3 respectivement.

Comme pour le Sujet 2, nous observons pour le Sujet 3 un comportement similaire lors des Cas 1 et Cas 3 (doigt relaxé avec et sans support).

#### 4.7.4 Analyse des résultats pour le Sujet 4

Les résultats d'estimation obtenus pour les paramètres globaux (4.55) et les paramètres de l'homme lors des expériences réalisées avec le Sujet 4 sont montrés dans le Tableau 6.17.

Pour le Sujet 4, nous observons une variation significative de la masse lors des quatre cas, comme pour le Sujet 2. Les valeurs de la masse  $\hat{m}_H$  obtenues sont de  $54.7gr$  pour le Cas 1,  $72.7gr$  pour le Cas 2,  $70.0gr$  pour le Cas 3 et  $60.8gr$  pour le Cas 4.

Nous observons la raideur  $\hat{k}_H$  la plus importante dans le Cas 4, donc un comportement similaire à celui du Sujet 3 et contraire à celui des deux premiers sujets. Nous observons que les raideurs sont plus basses pour les deux cas avec support (Cas 1 et Cas 2) et plus élevées pour les cas sans support (Cas 3 et Cas 4).

Cas	Masse Estimée		Viscosité Estimée		Raideur Estimée	
	$\hat{m}_T$ (Kg)	$\hat{m}_H$ (Kg)	$\hat{b}_T$ (Ns/m)	$\hat{b}_H$ (Ns/m)	$\hat{k}_T$ (N/m)	$\hat{k}_H$ (N/m)
1	0.3547	$54.7 \cdot 10^{-3}$	17.6185	6.2685	1481.8972	346.8972
2	0.3727	$72.7 \cdot 10^{-3}$	20.0700	8.7200	1594.0488	459.0488
3	0.3700	$70.0 \cdot 10^{-3}$	17.0867	5.7367	1667.9000	532.9000
4	0.3608	$60.8 \cdot 10^{-3}$	23.5683	12.2183	1729.4495	594.4494

TABLEAU 6.17 – Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 4

Au niveau de la viscosité, comme pour les Sujets 2 et 3, nous obtenons des valeurs plus basses lorsque le doigt est relaxé (Cas 1 et Cas 3) et des valeurs plus élevées lors des cas où le doigt est rigide (Cas 2 et Cas 4).

Les résultats d'estimation obtenus pour les paramètres globaux (4.55) et les paramètres de l'homme lors des expériences réalisées avec le Sujet 5 sont montrés dans le Tableau 6.18.

Cas	Masse Estimée		Viscosité Estimée		Raideur Estimée	
	$\hat{m}_T$ (Kg)	$\hat{m}_H$ (Kg)	$\hat{b}_T$ (Ns/m)	$\hat{b}_H$ (Ns/m)	$\hat{k}_T$ (N/m)	$\hat{k}_H$ (N/m)
1	0.3605	$60.5 \cdot 10^{-3}$	15.4283	4.0783	1704.4870	569.4870
2	0.3102	$10.27 \cdot 10^{-3}$	17.0184	5.6684	1546.19	411.1996
3	0.3831	$83.1 \cdot 10^{-3}$	15.3021	3.9521	1652.9213	517.9213
4	0.3993	$99.3 \cdot 10^{-3}$	18.5795	7.2295	1989.9996	854.9996

TABLEAU 6.18 – Résultats de l'identification des paramètres globaux et des paramètres de l'homme pour le Sujet 5

Pour le Sujet 5, nous observons des valeurs importantes de la masse pour les Cas 1, 3 et 4. Ces valeurs sont respectivement de 60.5gr, 83.1gr et 99.3gr. Nous observons dans le Cas 2 une valeur plus faible de 10.27gr, comme pour le Sujet 3. De plus, dans le Cas 4, nous observons une masse importante, comme pour les Sujets 2 et 4.

Au niveau de la viscosité  $\hat{b}_H$ , nous observons la viscosité la plus élevée pour le Cas 4 avec une valeur de 7.22Ns/m. Nous observons, comme pour les Sujets 2, 3 et 4, des viscosités plus élevées lors que le doigt est rigide et plus basses lorsque le doigt est relaxé.

Nous observons la raideur la plus élevée lors du Cas 4, comme pour les Sujets 3 et 4, et la plus basse pour le Cas 2 comme pour les Sujets 1 et 3.

## 4.8 Analyse générale

Nous avons effectué des mesures sur le système couplé homme-objet virtuel, en le considérant comme un système dont les parties ne sont pas séparables. Basés sur cette hypothèse, nous avons identifié les paramètres du geste de l'homme, comme sa masse, sa raideur et sa viscosité. Nous avons observé la relation entre les paramètres obtenus pour chaque sujet et le geste exécuté. Même si le sujet exécute un geste passif sans mouvement et que la main garde la même configuration, nous pouvons observer une variation des paramètres identifiés selon le comportement de la main, c'est à dire la variation du tonus musculaire ou de la raideur du doigt. Ces résultats montrent l'existence des composantes passives du geste. Cependant, la reproductibilité entre deux expériences est très difficile puisque le comportement du

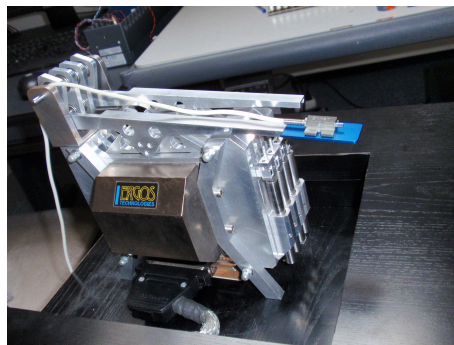


FIGURE 6.16 – Capteur de force sur la touche du TGR

sujet selon une consigne donnée peut varier d'une expérience à une autre. Pour certains cas, nous trouvons des comportements similaires entre certains sujets, par exemple, nous avons observé des valeurs de viscosité plus basses lorsque le doigt est relaxé et des viscosités plus élevées lorsque le doigt est rigide (pour les Sujets 2, 3, 4 et 5). Cependant, de façon général, il est difficile de trouver un comportement commun entre les sujets dû aux possibles différences d'exécution de la consigne.

En effet, même si nous demandons au sujet de poser le doigt sur la touche, relaxé dans deux cas, et rigide dans les deux autres, ces consignes ne sont pas suivies de la même façon par tous les sujets. De plus, nous avons remarqué lors des expériences que maintenir un comportement inchangé est quasiment impossible.

Nous avons alors choisi d'implanter un capteur de force externe sur la touche du TGR afin de définir un nouveau protocole expérimental avec une mesure directe de la force exercé par l'homme sur la touche, comme expliqué dans la Section 5.

## 5 Proposition d'un nouveau protocole expérimental

Afin d'obtenir une mesure directe de la force exercée par l'homme lors des expérience, nous proposons un nouveau protocole expérimental.

Pour cela, nous avons intégré au dispositif haptique un capteur de force externe.

Nous avons réalisé la connexion du capteur à la carte TORO pour l'acquisition des données. Pour cela, nous devons tenir compte de la connectique de la carte et ses limitations notamment en termes de tension. Cette connexion est effectuée via le boîtier d'interfaçage qui lie l'électronique à la carte, comme montré dans la Figure 6.17

Les entrées 0 à 7, appelées *positions basses* de la carte TORO, correspondant aux 8 voies disponibles dans l'électronique standard, sont toujours réservées au modèle temps réel. Le capteur est alors connecté du côté des *positions hautes*, correspondant aux entrées de 8 à 15. Ces entrées ne sont utilisées que dans les cas où le modèle nécessite un grand nombre de degrés de liberté ou produit du son. Pour récupérer les données de cette entrée, nous ajoutons dans le code du DSP une fonction nous permettant de transférer les données provenant du capteur à l'hôte pour les enregistrer dans un fichier, en utilisant le buffer circulaire, comme dans le cas de l'acquisition des données de position du TGR. Cela nous permet de regrouper toutes les données acquises lors d'une expérience.

Nous pourrions ainsi effectuer de nouvelles expériences, avec une mesure de la force exercé par le sujet sur la touche comme vérification du suivi de la consigne.



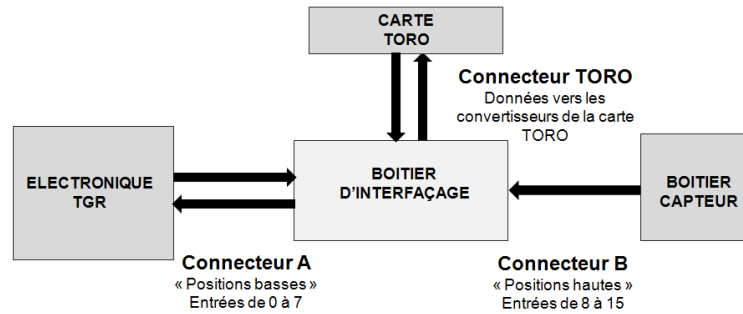


FIGURE 6.17 – Connexion du capteur de force au système et à la carte TORO pour l'acquisition des données

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une caractérisation du TGR à partir des données mesurées lors de la simulation haptique en utilisant un modèle défini implanté préalablement dans le simulateur. Cela nous a permis de valider la méthode d'identification proposée et validée préalablement avec des données issues de la simulation Matlab dans le Chapitre 4. Nous avons ensuite réalisé des expériences sur le couplage homme système haptique pour caractériser les modèles proposés dans le Chapitre 4. Les résultats de ces expériences valident l'hypothèse du THS.

Cependant, il est difficile de reproduire les comportements des sujets d'une expérience à l'autre. De plus, l'homme peut essayer de reproduire des comportements similaires à chaque fois qu'il lui sera demandé mais le comportement sera difficilement reproductible. De plus, les modifications des paramètres de la simulation haptique afin de comparer les mesures ne facilitent pas la tâche et peuvent créer une modification involontaire de la consigne de la part du sujet pour s'adapter à la simulation.

Dans de futurs travaux, il serait intéressant d'analyser et d'extraire les tendances d'un plus grand nombre de sujets et d'expériences. En effet, une meilleure connaissance de la variabilité des mesures vis à vis du triplet (Sujet,Cas,Expérience) permettrait une meilleure adaptabilité du dispositif aux différentes caractéristiques comportementales des futurs utilisateurs.

De plus, nous avons mis en place un nouveau protocole expérimental qui pourra être utilisé pour la réalisation de nouvelles expériences sur le couplage. Nous avons adapté un capteur de force externe à la tranche du TGR afin de savoir avec précision quelle force le sujet exerce lorsque qu'il met la main sur la touche. Cela constituera une référence plus précise pour la vérification de la consigne. Ce dispositif a été mis en place. De plus, le capteur a été connecté directement sur l'une des entrées disponibles de la carte TORO pour l'acquisition des données en même temps que les autres données de l'expérience.

En suivant le protocole expérimental proposé et en utilisant le dispositif mis en place dans cette thèse, nous pourrions également réaliser dans le futur de nouvelles mesures afin d'identifier les paramètres du système couplé homme-objet virtuel et notamment les paramètres du geste.

Les travaux décrits dans ce chapitre mettent en évidence la validation de la chaîne complète du dispositif pour l'analyse du couplage. En effet, pour élaborer cette analyse, nous nous sommes intéressés à la typologie du geste, nous avons proposé des modèles de couplage et étudié des techniques pour l'identification des paramètres de ces modèles. Ces techniques ont été, dans un premier temps, testées à partir des données issues de simulations Matlab puis ont été validées dans ce chapitre à partir des données réelles issues de la simulation haptique. Enfin, un important travail de préparation a été effectué sur la plateforme temps réel pour réaliser des expériences et acquérir des données. Ce travail est allé

---

de la conception à la construction du dispositif haptique en passant par la réalisation de la mécanique, l'électronique et le développement logiciel.





# Conclusion

Analyser l'homme lors d'une interaction mécanique implique étudier à la fois homme et le dispositif avec lequel il interagit, c'est à dire l'interface haptique. Nous avons alors étudié ces deux éléments comme un seul système dynamique, puis nous l'avons mesuré et nous avons validé son existence. Nous avons proposé une méthode pour l'analyse du couplage en situation de simulation haptique et nous avons abouti à des modèles fonctionnels de l'ensemble main-interface haptique. L'analyse des méthodes d'identification des modèles proposés a été fondamentale pour la caractérisation du couplage.

L'étude réalisée lors de cette thèse est pluridisciplinaire. Elle est à l'intersection de domaines variés tels que l'haptique, l'automatique et les sciences cognitives.

En effet, lors de l'analyse du couplage homme-système haptique, nous devons prendre en compte les domaines d'étude de chacune des parties interagissant : l'homme, l'objet virtuel et l'interface servant d'intermédiaire entre les deux.

Lors de la première phase de cette thèse, nous avons effectué une étude théorique pour l'élaboration de l'état de l'art, la définition de la méthode à utiliser pour l'étude du couplage, le choix des situations représentatives du couplage à analyser, la modélisation de ces situations et le choix des méthodes pour les caractériser.

Nous avons ainsi effectué un état de l'art sur le couplage homme-objet dans les disciplines ciblées par cette étude. Nous avons observé que les études du couplage et de la perception dans les sciences cognitives restent indissociables des domaines technologiques. Indépendamment de l'étude du couplage, il est essentiel de réaliser une étude sur l'homme lors de la conception des divers dispositifs qu'il sera amené à utiliser.

A partir de cet état de l'art, nous avons établi différentes catégories du couplage d'une part suivant la nature des deux parties interagissant (homme/objet) et d'autre part selon l'environnement de l'entité (réel/simulé). Nous avons identifié la catégorie de notre étude : le couplage médiatisé entre l'homme et l'objet, c'est à dire l'interaction entre l'homme et un objet virtuel via une interface haptique.

Nous avons choisi de considérer la relation homme-objet virtuel suivant l'hypothèse d'un système hybride temporaire (THS). Ce système est considéré fermé et formé indissociablement par l'objet virtuel, l'interface et une partie limitée de l'homme. L'interface haptique, maillon constitutif de ce THS dans la situation médiatisée, a été considérée comme un objet d'étude mais également comme un outil d'analyse. Elle nous a ainsi permis d'acquérir des mesures lors du couplage.

Nous avons ensuite réalisé une typologie du geste permettant de délimiter les situations ou les tâches de référence pour l'analyse du couplage. Nous avons orienté notre choix vers des gestes périodiques impliquant un contact physique entre l'homme et l'environnement. Ceux-ci peuvent être préhensiles ou non, actifs ou passifs.

A partir des gestes choisis et en considérant l'hypothèse du THS, nous avons proposé deux modèles pour le couplage représentant l'interaction dans le cas de mouvements périodiques : un modèle basé sur

l'équation de Van der Pol et un modèle des oscillations auto-entretenues. Nous avons considéré que ces modèles peuvent décrire parfaitement l'interaction homme-système haptique lors de l'exécution d'une tâche périodique.

Dans le cas du modèle de Van der Pol, nous avons considéré qu'il décrit les mouvements de l'homme lorsqu'il manipule un objet virtuel passif de type ressort-frottement dans le simulateur haptique.

Dans le cas du modèle des oscillations auto-entretenues, nous avons implanté un objet virtuel actif sur la plateforme temps réel afin de provoquer des oscillations de la touche du dispositif haptique et d'analyser le geste passif.

Le but étant de caractériser ces modèles proposés, nous avons étudié des méthodes nous permettant d'identifier leurs paramètres. Malgré la non linéarité des modèles, ils ont pu être représentés par des équations linéaires par rapport à ses paramètres, permettant l'utilisation de la méthode des moindres carrés. Dans le cas du modèle de Van der Pol, nous avons étudié également l'utilisation d'un filtre de Kalman-Bucy étendu. Ces méthodes se sont montrées adéquates pour l'identification des paramètres de ces modèles. Dans un premier temps, elles ont été testées et validées en utilisant des signaux issus de simulations des modèles sous Matlab. Nous avons ainsi considéré des cas sans perturbations et des cas plus réalistes où un bruit est ajouté au système.

Afin de caractériser les modèles du couplage établis à partir des mesures acquises lors des situations de couplage, nous avons réalisé diverses expériences.

Lors de la deuxième phase, nous avons alors effectué un travail technique et de développement sur le simulateur haptique pour la mise en œuvre d'un dispositif pour l'analyse expérimentale du couplage en situation de simulation avec une interaction haptique.

Pour la réalisation de ces expériences, nous avons implémenté un dispositif nous permettant d'acquérir les mesures du geste en temps réel lors d'une interaction gestuelle avec des objets virtuels. Ce dispositif a été implémenté à partir d'une plateforme de simulation haptique ERGON\_X standard. Nous avons donc construit un dispositif haptique de la gamme ERGOS avec de bonnes performances pour la réalisation des mesures lors du couplage. Puis, nous avons implanté des modèles sur la plateforme temps réel et nous avons mis en place un système d'acquisition de données ayant une fréquence de simulation et d'acquisition élevée de  $10kHz$  et conservant le synchronisme.

La mise en œuvre de ce dispositif implique la prise en main de la plateforme temps réel ERGON\_X, allant de la mécanique du dispositif haptique à l'architecture logicielle, en passant par le conditionneur électronique reliant les deux. Nous avons ainsi mis en place une documentation pour son utilisation et un guide pour l'implantation de nouveaux modèles. La plateforme ne comportant pas d'outil de modélisation, les travaux d'implantation des modèles, d'ajout de modules et de définition de nouveaux paramètres, impliquent une connaissance approfondie de l'architecture de simulation.

Même si nous disposions auparavant d'une interface performante, elle n'était pas adaptée pour acquérir directement les mesures lors des expériences du couplage. La plateforme utilisée est le résultat de plusieurs années de recherches au sein du laboratoire ICA/ACROE. Cependant, plusieurs améliorations ont dû lui être apportées. Nous avons implanté un protocole d'acquisition, et nous avons établi le transfert des données par DMA.

De plus, nous avons effectué une étude du simulateur pour établir les équivalences entre les paramètres et les signaux réels et virtuels en entrée et en sortie du simulateur. Ces équivalences nous ont permis de trouver la signification physique des données acquises et des paramètres simulés. Elles nous ont permis de comparer les simulations effectuées sur la plateforme temps réel avec celles effectuées à l'aide de l'outil Matlab afin de vérifier le comportement du modèle sur la plateforme temps-réel. Cette étape est essentielle pour l'acquisition d'une connaissance approfondie de la plateforme, de son architecture

logicielle et de son électronique. Il faudrait néanmoins apporter des améliorations supplémentaires à ce dispositif afin de simplifier la création et la simulation de modèles pour un utilisateur non expert. Il faudrait également considérer des améliorations au niveau de l'électronique pour réduire le bruit dans le système. De plus, même si nous avons construit soigneusement le dispositif haptique utilisé pour les expériences, nous avons observé un frottement sec présent dans les touches du dispositif. Il faudrait revoir la conception mécanique du dispositif et optimiser son fonctionnement.

Notre rôle ne s'est pas limité à celui d'un simple utilisateur de ce type de plateforme. En effet nous avons également participé à la conception et au développement de nouvelles plateformes, au niveau logiciel, électronique et mécanique. Les plateformes développées sont par exemple, la console *Gamma* à douze degrés de liberté utilisée pour l'enseignement du master Art Science Technologie et la nouvelle version de la console *Toucher les Nanomondes*. Cette dernière fait partie de l'expositions itinérante du Centre de Culture Scientifique Technique et Industrielle de Grenoble (CCSTI) et est actuellement exposée à Chambéry. Nous lui avons également développé un nouveau modèle avec commutation de paramètres selon le cas observé : le monde à échelle métrique ou le monde à échelle nanométrique. Nous avons ainsi acquis une expertise dans la conception de nouvelles cartes électroniques et de façon générale dans le fonctionnement global du dispositif. Toutes ces tâches ont impliqué un travail technique très important, mais ont été nécessaires à la mise en place des expériences réalisées durant cette thèse.

Ce dispositif pour l'analyse expérimentale du couplage présente un avantage particulier, il est différent de ceux utilisés en sciences cognitives, comme des systèmes de capture du mouvement qui permettent seulement des mesures sur des gestes libres. En effet, dans le cadre de notre étude, les mesures sont prises directement sur le dispositif haptique servant de médiateur entre l'homme et l'objet virtuel. De plus, il est important de noter que l'implantation des modèles sur la plateforme temps réel est effectuée suivant le formalisme de modélisation physique particulière Cordis Anima. L'avantage de ce formalisme est la modularité de la construction des modèles permettant facilement l'ajout de nouvelles parties au modèle, tels que le TGR ou l'homme.

Lors de la troisième phase, nous avons utilisé la plateforme ERGON\_X modifiée pour l'acquisition de données du couplage en situation de simulation haptique lors des expériences présentées dans le Chapitre 6.

Grâce à ce dispositif, nous avons réalisé une caractérisation du TGR à partir des données mesurées lors de la simulation haptique en utilisant un modèle que nous avons défini et implanté dans le simulateur. Celle-ci nous a permis de valider la méthode d'identification de paramètres proposée à partir des données de position réelles.

Nous avons également réalisé et analysé des expériences sur les situations de couplage avec une interaction haptique. Les modèles de couplage proposés ont été quantifiés à partir des signaux en identifiant ses paramètres par la méthode des moindres carrés. Ces mesures ont mis en évidence le système couplé et l'existence du THS.

Néanmoins, lors des expériences, nous avons remarqué qu'il est difficile pour l'homme de reproduire exactement le même comportement. Les comparaisons entre les mesures de deux sujets différents sont donc très difficiles. De plus, les consignes données au sujet peuvent être exécutées de façon différente par chacun des sujets, donnant des comportements différents pour un cas donné.

Afin de surmonter cette difficulté, nous avons proposé un nouveau protocole pour la réalisation des expériences. Celles-ci seront possibles en établissant la fréquence et l'amplitude des oscillations dans le cas des gestes actifs et la force appliquée sur le dispositif dans le cas du geste passif. Dans ce protocole, nous avons proposé d'adapter un capteur de force à la tranche du TGR afin de mesurer la force appliquée lorsque le sujet met sa main sur la touche. Cette mesure de force constitue une référence plus précise pour comparer les comportements de deux sujets pour un cas donné. Ce capteur a été connecté

directement sur l'une des entrées disponibles de la carte TORO pour l'acquisition des données de la force appliqué avec les autres données de l'expérience.

Malgré le comportement variable de certains sujets, ces travaux constituent une première approche pour la validation de l'hypothèse du système couplé homme-interface haptique. Nous avons effectué une analyse à partir des modèles fonctionnels en réalisant des expériences pour obtenir des données qualitatives et quantitatives sur le système grâce à l'identification des paramètres. Lors de la réalisation des expériences, nous avons approfondi nos connaissances sur l'homme en interaction mécanique en utilisant les concepts théoriques et les dispositifs haptiques de manière complémentaire.

Désormais, le dispositif pour l'analyse du couplage est complètement opérationnel. Il est composé d'un simulateur temps réel modifié pour l'acquisition des données. Grâce aux modifications mises en place et aux nouvelles documentations sur l'utilisation du simulateur et sur l'implantation des modèles sur celui-ci suivant le formalisme Cordis Anima, de nouvelles expériences pourront être facilement réalisées en utilisant ce dispositif.

Enfin, nous avons proposé un changement d'approche méthodologique dans l'étude de l'interaction homme-système haptique. Ces travaux de thèse ouvrent de nouvelles perspectives dans la conception des systèmes permettant ce type d'interaction et dans la connaissance de l'homme basée sur des méthodes issues de l'automatique.

## Perspectives

A partir du dispositif implémenté dans cette thèse pour l'analyse du couplage et des résultats obtenus, de nouvelles expériences pourront être réalisées. Nous avons établi un nouveau protocole expérimental intégrant un capteur de force externe afin de pouvoir mesurer directement la force exercée par le sujet sur la touche lors des expériences. Nous pourrions par exemple, comparer les mesures obtenues lors de l'exécution d'une même tâche dans différents cas en fonction des paramètres de l'objet virtuel.

En effet, nous pourrions implémenter de nouvelles expériences définissant une variation plus large des paramètres de l'objet virtuel et répéter ces expériences sur différents sujets.

En utilisant ce dispositif, d'autres situations périodiques comme le tapping pourront être étudiées et analysées. Ce type de mouvement consiste en l'action d'appliquer des percussions répétitives sur un objet ou sur une surface sonore, avec un doigt ou en utilisant un outil tel qu'un marteau. Ce type de situation peut être étudiée dans le cas de la simulation haptique. Dans ce cas, le modèle comporte non linéarités qui peuvent constituer une situation plus favorable pour l'identification.

Pour les analyses des gestes actifs périodiques, le modèle auto-entretenu pourra être utilisé pour l'identification des paramètres.

L'analyse du couplage pourra ensuite être étendue à d'autres gestes actifs, au delà des situations périodiques grâce au dispositif mis en place et aux méthodes étudiées lors de cette thèse.

Il sera alors possible de définir de nouveaux critères et de nouvelles spécifications pour le développement des systèmes haptiques existants et pour leur amélioration selon des critères de transparence et de stabilité.

# Bibliographie

- [Allaoui, 2010] Allaoui, A. (2010). *Introduction de processus de conception pour la modélisation interactive de modèles physiques particuliers 3D complexes dans l'environnement MIMESIS*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France.
- [Aoi and Tsuchiya, 2005] Aoi, S. and Tsuchiya, K. (2005). Locomotion control of biped robot using nonlinear oscillators. *Autonomous robots*, 19(3) :219–232.
- [Atherton, 2011] Atherton, J. S. (2011). Learning and teaching. enactive, iconic and symbolic levels of representation. <http://www.learningandteaching.info/learning/dale-bruner.htm>.
- [Beek and Beek, 1988] Beek, P. J. and Beek, W. J. (1988). Tools for constructing dynamical models of rhythmic movement. *Human Movement Science*, 7(2-4) :301–342.
- [Bekey et al., 1993] Bekey, G. A., Liu, H., Tomovic, R., and Karplus, W. (1993). Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(6) :709–722.
- [Bergé et al., 1988] Bergé, P., Pommeau, Y., and Vidal, C. (1988). *L'ordre dans le chaos*.
- [Berthoz, 1978] Berthoz, A. (1978). *Du contrôle moteur à l'organisation du geste*, Chapitre : Rôle de la proprioception dans le contrôle de la posture et du geste. Contribution de quelques récepteurs à la détection des mouvements, pages 187–224. Masson, Paris, France.
- [Besancon et al., 2010] Besancon, G., Voda, A., and Jouffroy, G. (2010). A note on state and parameter estimation in a van der Pol oscillator. *Automatica*, 46(10) :1735–1738.
- [Biagiotti et al., 2004] Biagiotti, L., Lotti, F., Melchiorri, C., and Vassura, G. (2004). How far is the human hand? a review on anthropomorphic robotic end-effectors. Technical report, University of Bologna, Bologna, Italy.
- [Biederman, 1987] Biederman, I. (1987). Recognition-by-components : A theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94(2) :115–147.
- [Bonnet et al., 1994] Bonnet, M., Guiard, Y., Requin, J., and Semjen, A. (1994). *Traité de psychologie expérimentale*, volume 2, Chapitre III-1 : Mécanismes généraux de la motricité, pages 587–656. Presses Universitaires de France.
- [Borst et al., 2003] Borst, C., Fischer, M., Haidacher, S., Liu, H., and Hirzinger, G. (2003). DLR hand II : Experiments and experiences with an anthropomorphic hand. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, volume 1, pages 702 – 707, Taipei, Taiwan.
- [Bruner, 1966] Bruner, J. S. (1966). *Toward a theory of instruction*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- [Burdea, 1996] Burdea, G. (1996). *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley & Sons Inc.
- [Cadoz, 1988] Cadoz, C. (1988). Informatique et outil de création musicale. *Revue Marsyas*, 7(7) :18–29.

- [Cadoz, 1994] Cadoz, C. (1994). Le geste canal de communication homme/machine : La communication instrumentale. *Technique et Science Informatique*, 13(1) :31–61.
- [Cadoz et al., 1990] Cadoz, C., Lisowski, L., and Florens, J. L. (1990). A modular feedback keyboard design. *Computer Music Journal*, 14(2) :47–51.
- [Cadoz et al., 1984] Cadoz, C., Luciani, A., and Florens, J. L. (1984). Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms : The cordis system. *Computer Music Journal*, 8(3) :60–73.
- [Cadoz et al., 1993] Cadoz, C., Luciani, A., and Florens, J. L. (1993). Cordis-anima : a modeling and simulation system for sound and image synthesis - The general formalism. *Computer Music Journal*, 17(1) :19–29.
- [Carignan and Akin, 2003] Carignan, C. and Akin, D. L. (2003). Using robots for astronaut training. *IEEE Control Systems*, 23(2) :46 – 59.
- [Castagne, 2002] Castagne, N. (2002). *GENESIS un environnement pour la création musicale à l'aide de modèles physiques particulières*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France.
- [Chinellato and del Pobil, 2005] Chinellato, E. and del Pobil, A. P. (2005). *Mechanisms, symbols and models underlying cognition*, volume 3561 of *Lectures Notes in Computer Sciences*, Chapter : Vision and Grasping : Human vs. Robots, pages 366–375. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Colgate and Brown, 1994] Colgate, J. E. and Brown, J. M. (1994). Factors affecting the z-width of a haptic display. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, pages 3205–3210, San Diego, CA, USA.
- [Colgate et al., 1995] Colgate, J. E., Stanley, M. C., and Brown, J. M. (1995). Issues in the haptic display of tool use. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, volume 3, pages 140–145.
- [Couroussé, 2008] Couroussé, D. (2008). *Haptic Procesor Unit : vers une plate-forme transportable pour la simulation temps-réel synchrone multisensorielle*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France.
- [Couroussé and Florens, 2007] Couroussé, D. and Florens, J. L. (2007). Functional analysis of haptic devices. In *Proceedings of the 4th International Conference on Enactive Interfaces, Enactive 07*, pages 57–60, Grenoble, France.
- [Cutkosky, 1989] Cutkosky, M. R. (1989). On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(3) :269–279.
- [Delignières et al., 1999] Delignières, D., Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B., and Caillou, N. (1999). Effects of practice and task constraints on stiffness and friction functions in biological movements. *Human Movement Science*, 18(6) :769–793.
- [Dingwell et al., 2003] Dingwell, J. B., Mah, C. D., and Mussa-Ivaldi, F. A. (2003). Experimentally confirmed mathematical model for human control of a non-rigid object. *Journal of Neurophysiology*, 91 :1158–1170.
- [Dortier, 1999] Dortier, J. F. (1999). *Le cerveau et la pensée : La révolution des sciences cognitives*, Chapitre : Questions sur la pensée, pages 3–13. Sciences Humaines, Auxerre, France.
- [Ehrenberg, 2004] Ehrenberg, A. (2004). Le sujet cérébral. *Revue Esprit*, pages 130–155.
- [Enactive Network, 2007] Enactive Network (2007). *Enaction and enactive interfaces : A handbook of terms*. Enactive Systems Books, Grenoble, France.



- [Fels, 2000] Fels, S. (2000). Intimacy and embodiment : Implications for art and technology. In *Proceedings of the 2000 ACM workshops on Multimedia*, pages 13–16, Los Angeles, California, USA.
- [Feynman et al., 1979] Feynman, Leighton, and Sands (1979). *Le cours de physique de Feynman. Mécanique 1*. Paris, France.
- [Fischer et al., 1998] Fischer, M., van der Smagt, P., and Hirzinger, G. (1998). Learning techniques in a dataglove based telemanipulation system for the DLR hand. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, volume 2, pages 1603–1608.
- [Fishkin et al., 2000] Fishkin, K. P., Gujar, A., Harrison, B. L., Moran, T. P., and Want, R. (2000). Embodied user interfaces for really direct manipulation. *Communications of the ACM*, 43(9) :75–80.
- [Flach and Holden, 1998] Flach, J. M. and Holden, J. G. (1998). The reality of experience : Gibson’s way. *Presence*, 7(1) :90–95.
- [Flatau, 1969] Flatau, C. R. (1969). General purpose servo manipulator for remote maintenance of accelerators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 16(3) :594–598.
- [Florens, 1978] Florens, J. L. (1978). *Coupleur Gestuel Retroactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés en temps réel*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France.
- [Florens, 2008] Florens, J. L. (2008). Technologies de la simulation interactive de modèles physiques multisensoriels. Mémoire d’Habilitation à Diriger les Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG).
- [Florens and Cadoz, 1990] Florens, J.-L. and Cadoz, C. (1990). Modèles et simulation en temps réel de corde frottée. In *Colloque de physique / Colloque C2*, volume 51, pages 873–876, Paris, France.
- [Florens et al., 2004] Florens, J. L., Luciani, A., Castagne, N., and Cadoz, C. (2004). Ergos : a multi-degrees of freedom and versatile force feedback panoply. In *Proceedings of the EuroHaptics Conference*, pages 356–360, Germany.
- [Florens and Urma, 2006] Florens, J. L. and Urma, D. (2006). Dynamical issues at the low level of human / virtual object interaction. In *Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 06*, pages 315–320, Arlington, VA, USA.
- [Florens et al., 2006] Florens, J. L., Voda, A., and Urma, D. (2006). Dynamical issues in interactive representation of physical objects. In *Proceedings of the EuroHaptics Conference*, pages 213–219.
- [Fuchs et al., 2006] Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., and Vercher, J. L. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1. Paris, France.
- [Gallego et al., 2010] Gallego, J. A., Roncon, E., Roa, J. O., Moreno, J. C., and Pons, J. L. (2010). Real-time estimation of pathological tremor parameters from gyroscope data. *Sensors*, 10 :2129–2149.
- [Gautier and Poignet, 2001] Gautier, M. and Poignet, P. (2001). Extended Kalman filtering and weighted least squares dynamic identification of robot. *Control Engineering Practice*, 9 :1361–1372.
- [Gentaz, 2004] Gentaz, E. (2004). *Chapitre de livre sous presse*, Explorer pour percevoir l’espace avec la main : le sens haptique.
- [Gerald and Wheatly, 2003] Gerald, C. and Wheatly, P. (2003). *Applied numerical analysis*. Addison Wesley.
- [Gibet, 1987] Gibet, S. (1987). *Codage, représentation et traitement du geste instrumental : application à la synthèse de sons musicaux par simulation de mécanismes instrumentaux*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France.
- [Gibson, 1979] Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin Company, Boston.



- [Goertz, 1952] Goertz, R. C. (1952). Fundamental of general-purpose remote manipulator. *Nucleonics*, 10(11) :36–45.
- [Goertz and Thompson, 1954] Goertz, R. C. and Thompson, W. M. (1954). Electronically controlled manipulator. *Nucleonics*, 12(11) :46–47.
- [Grewal and Andrews, 2001] Grewal, M. S. and Andrews, A. P. (2001). *Kalman Filtering : Theory and Practice Using MATLAB*. John Wiley & Sons, Inc, second edition.
- [Griffiths, 1943] Griffiths, H. E. (1943). Treatment of the injured workman. *The Lancet*, 241(6250) :729–733.
- [Gurram et al., 1995] Gurram, R., Rakheja, S., and Gouw, G. (1995). Mechanical impedance of the human hand-arm system subject to sinusoidal and stochastic excitations. *Internal Journal of Industrial Ergonomics*, 16 :135–145.
- [Hannaford et al., 1991] Hannaford, B., Wood, L., McAfee, D. A., and Zak, H. (1991). Performance evaluation of a six-axis generalized force-reflecting teleoperator. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3) :620–633.
- [Hans et al., 2002] Hans, M., Graf, B., and Schaft, R. D. (2002). Robotic home assistant Care-O-bot : Past - Present - Future. In *Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 380–385, Berlin, Germany.
- [Hardy-Baylé, 2002] Hardy-Baylé, M. C. (2002). Sciences cognitives et psychiatrie. *L'Evolution Psychiatrique*, 67(1) :83–112.
- [Hayward et al., 2004] Hayward, V., Astley, O., Cruz-Hernandez, M., Grant, D., and de-la Torre, G. R. (2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1) :16–29.
- [Heidegger, 1977] Heidegger, M. (1977). *Being and Time*. Harper Collins, San Francisco, CA, USA.
- [Hogan, 1992] Hogan, N. (1992). Control of contact in robots and biological systems. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 11(4) :81 – 82.
- [Iberall, 1987] Iberall, T. (1987). The nature of human prehension : Three dexterous hands in one. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, pages 396–401, Raleigh, NC.
- [Ijspeert, 2001] Ijspeert, A. J. (2001). A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. *Biological Cybernetics*, 84 :331–348.
- [Innovative Integration, 2009] Innovative Integration (2009). Toro user's manual.
- [Jeannerod, 1984] Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16 :235–254.
- [Jordan and Wolpert, 1999] Jordan, M. I. and Wolpert, D. M. (1999). *The cognitive neurosciences*, Chapter : Computational motor control. Cambridge, MA : MIT Press.
- [Kapandji, 1989] Kapandji, A. I. (1989). La prehension dans la main humaine. *Annales de Chirurgie de la Main*, 8(3) :234–241.
- [Kazi et al., 2008] Kazi, S., As'arry, A., Md. Zain, M. Z., Mailah, M., and Hussein, M. (2008). Study the bio-dynamic of the human hand-arm models under vibration. In *Proceedings of the Innovative Production Machines and Systems Conference, IPROMS*.
- [Keller et al., 1947] Keller, A. D., Taylor, C. L., and Zahm, V. (1947). Studies to determine the functional requirements for hand and arm prosthesis. Technical report, Department of Engineering, UCLA, Los Angeles, CA, USA.
- [Lacy and Bernstein, 2003] Lacy, S. and Bernstein, D. (2003). Identification of systems with limit cycles. In *Proceedings of the American Control Conference, ACC*, volume 5, pages 3863– 3868.

- [Lawrence, 1993] Lawrence, D. A. (1993). Stability and transparency in bilateral teleoperation. *Transactions on Robotics and Automation*, 9(5) :624–637.
- [Lawrence et al., 2000] Lawrence, D. A., Pao, L. Y., Dougherty, A. M., Salada, M. A., and Pavlou, Y. (2000). Rate-hardness : A new performance metric for haptic interfaces. *Transactions on Robotics and Automation*, 16(4) :357–371.
- [Lawrence et al., 1996] Lawrence, D. A., Pao, L. Y., Salada, M. A., and Dougherty, A. M. (1996). Quantitative experimental analysis of transparency and stability in haptic interfaces. In *Proceedings of the 5th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and teleoperator Systems*, pages 441–449, Atlanta, GA, USA.
- [Liu et al., 1989] Liu, H., Iberall, T., and Bekey, G. A. (1989). The multi-dimensional quality of task requirements for dextrous robot hand control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, volume 1, pages 452–457, Scottsdale, AZ, USA.
- [Ljung and Söderström, 1983] Ljung, L. and Söderström, T. (1983). *Theory and practice of recursive identification*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- [Lyons, 1985] Lyons, D. M. (1985). A simple set of grasps for a dextrous hand. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, volume 2, pages 588 – 593.
- [MacKenzie and Iberall, 1994] MacKenzie, C. R. and Iberall, T. (1994). *The grasping hand*. Advances in Psychology. North-Holland.
- [Marlière, 2006] Marlière, S. (2006). *Conception et réalisation d'un nouvel outil à réalité mixte et retour d'effort pour toucher et créer les nanomondes*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France.
- [Masataka et al., 2006] Masataka, N., Konyo, M., Maeno, T., and Tadokoro, S. (2006). Reflective grasp control of humans induced by distributed vibration stimuli on finger skin with ICPF actuators. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, Orlando, FL, USA.
- [McBride, 1942] McBride, E. D. (1942). *Disability evaluation*. J. B. Lippincott Company, Philadelphia, London, Montreal, third edition.
- [McLeod, 2008] McLeod, S. A. (2008). Simply psychology. <http://www.simplypsychology.org/bruner.html>.
- [Minsky, 1980] Minsky, M. (1980). Telepresence. *OMNI magazine*.
- [Morasso, 1981] Morasso, P. (1981). Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, 42 :223–227.
- [Mori et al., 2003] Mori, M., Maeno, T., and Yamada, Y. (2003). Method for displaying partial slip used for virtual grasp. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pages 3100–3105, Las Vegas, NV, USA.
- [Mottet and Bootsma, 1999] Mottet, D. and Bootsma, R. J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, 80(4) :235–245.
- [Mottet and Bootsma, 2001] Mottet, D. and Bootsma, R. J. (2001). The dynamics of rhythmical aiming in 2d task space : Relation between geometry and kinematics under examination. *Human Movement Science*, 20(3) :213–241.
- [Napier, 1956] Napier, J. R. (1956). The prehensile movements of the human hand. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 38-B(4) :902–913.
- [Pasquinelli, 2007] Pasquinelli, E. (2007). *Enaction and enactive interfaces : A handbook of terms*, Chapter : Enactive Knowledge. Enactive Systems Books, Grenoble, France.
- [Patanè et al., 2007] Patanè, F., Mattoli, V., Laschi, C., Mazzolai, B., Dario, P., Ishii, H., and Takanishi, A. (2007). Biomechatronic design and development of a legged rat robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, pages 847 – 852, Sanya, China.

- [Poignet and Gauthier, 2000] Poignet, P. and Gauthier, M. (2000). Comparison of weighted least squares method and extended Kalman filtering methods for dynamic identification of robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, San Francisco, CA.
- [Raju et al., 1989] Raju, G. J., Verghese, G., and Sheridan, T. (1989). Design issues in 2-port network models of bilateral remote teleoperation. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Robotics and Automation, ICRA*, pages 1317–1321, Scottsdale, AZ, USA.
- [Rakheja et al., 2002] Rakheja, S., Wu, J. Z., Dong, R. G., and Schopper, A. W. (2002). A comparison of biodynamic models of the human hand-arm system for applications to hand-held power tools. *Journal of Sound and Vibration*, 249(1) :55–82.
- [Ramstein, 1991] Ramstein, C. (1991). *Analyse, représentation et traitement du geste instrumental*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG).
- [Reif et al., 1998] Reif, K., Sonneman, F., and Unbehauen, R. (1998). An EKF-Based nonlinear observer with a prescribed degree of stability. *Automatica*, 34(9) :1119–1123.
- [Rogalla et al., 2002] Rogalla, O., Ehrenmann, M., Zöllner, R., Becher, R., and Dillmann, R. (2002). Using gesture and speech control for commanding a robot assistant. In *Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 454–459, Berlin, Germany.
- [Salisbury et al., 2004] Salisbury, K., Conti, F., and Barbagli, F. (2004). Haptic rendering : Introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24 :24–32.
- [Schaal, 2002] Schaal, S. (2002). *The handbook of brain theory and neural networks*, Chapter : Arm and hand movement control, pages 110–113. MIT Press, Cambridge MA, 2nd edition.
- [Schlesinger, 1919] Schlesinger, G. (1919). *Ersatzglieder und Arbeitshilfen*, Der Mechanische Aufbau der Kunstlichen Glieder.
- [Schmidt, 2004] Schmidt, H. (2004). Haptic walker - a novel haptic device for walking simulation. In *Proceedings of the Eurohaptics Conference*, pages 60–67, Munich, Germany.
- [Sheridan, 2002] Sheridan, T. B. (2002). Some musings on four ways human couple. implications for systems design. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics. Part A : Systems and humans*, 32(1) :5–10.
- [Slocum and Pratt, 1944] Slocum, D. B. and Pratt, D. R. (1944). The principles of amputations of the fingers and hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 26 :535–546.
- [Slocum and Pratt, 1946] Slocum, D. B. and Pratt, D. R. (1946). Disability evaluation for the hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 28 :491–495.
- [Soechting and Lacquaniti, 1981] Soechting, J. and Lacquaniti, F. (1981). Invariant characteristics of a pointing movement in man. *The Journal of Neuroscience*, 1(7) :710–720.
- [Stewart, 2007] Stewart, J. (2007). *Enaction and enactive interfaces : A handbook of terms*, Chapter : Enactive Cognitive Sciences 1. Enactive Systems Books, Grenoble, France.
- [Sulzer et al., 2007] Sulzer, J., Salamat, A., Chib, V., and Colgate, J. E. (2007). A behavioral adaptation approach to identifying visual dependence of haptic perception. In *Proceedings of the 2nd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, WHC*, Tsukuba, Japan.
- [Svinin et al., 2005] Svinin, M., Goncharenko, I., Luo, Z., and Hosoe, S. (2005). Reaching movements in dynamic environments : How do we move flexible objects ? In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*.
- [Tache, 2008] Tache, O. (2008). *Conception d'un instrumentarium pour la création musicale à l'aide des modèles physiques Cordis-Anima*. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble (Grenoble INP), Grenoble, France.

- [Taylor and Schwarz, 1955] Taylor, C. L. and Schwarz, R. L. (1955). The anatomy and the mechanics of the human hand. *Artificial Limbs*, 2(2) :22–35.
- [Taylor and Stoianovici, 2003] Taylor, R. H. and Stoianovici, D. (2003). Medical robotics in computer-integrated surgery. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5) :765–781.
- [Tee et al., 2006] Tee, K. P., Burdet, E., Chew, C. M., and Miller, T. E. (2006). A model of force and impedance in human arm movements. *Biological Cybernetics*, 90(5) :368 – 375.
- [Uhl, 1996] Uhl, C. (1996). *Architecture de machine pour la simulation d'objets physiques en temps-réel*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France.
- [van der Pol, 1920] van der Pol, B. (1920). A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations. *Radio Review*, 1 :701–710.
- [Varela et al., 1991] Varela, F., Thompson, E., and Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind : Cognitive Science and Human Experience*. Cognitive Science : Philosophy, Psychology. MIT Press.
- [Zahornik and Jenison, 1998] Zahornik, P. and Jenison, R. L. (1998). Presence as being-in-the-world. *Presence*, 7(1) :78–89.



## Annexe A

# Le Formalisme Cordis Anima

Cordis Anima est un outil de modélisation et de simulation d'objets physiques basé sur la mécanique Newtonienne. Cordis Anima est à la fois un formalisme générique et un langage [Cadoz et al., 1993], permettant de concevoir et de décrire tout objet physique et tout comportement dynamique que l'utilisateur souhaite modéliser et simuler à l'aide de l'ordinateur. Il est basé sur les principes d'interaction et de modularité. Il est constitué d'un réseau de modules élémentaires connectés entre eux pour former un modèle. Chacun de ces modules a une signification physique, ce qui garantit la construction de modèles physiques sans importer leur complexité.

### A.1 Les points de communication

Comme dans la mécanique Newtonienne, les modules Cordis Anima sont connectés à travers des points de communication associant de manière duale, des variables extensives (des positions) et intensives (des forces). Ces variables peuvent être des scalaires (version unidimensionnelle) ou des vecteurs (version multidimensionnelle). Il existe deux types complémentaires de points de communication pour échanger des variables :

- Les points de communication « M » ayant comme entrée une variable intensive (une force) et comme sortie une variable extensive (une position)
- Les points de communication « L » ayant comme entrée une variable extensive (une position) et comme sortie une variable intensive (une force)

Dans la Figure A.1, nous pouvons observer la représentation des points de communication « M » et « L » de Cordis Anima.

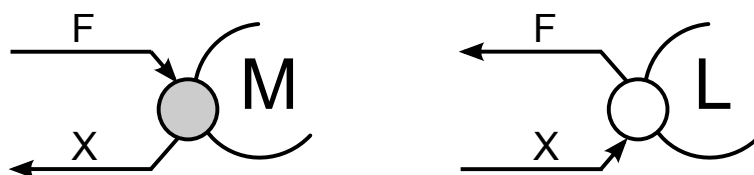


FIGURE A.1 – Représentation des points de communication Cordis Anima

Lorsque deux points de communication sont connectés, ils échangent leurs entrées et leurs sorties c'est à dire la sortie de l'un est utilisée comme l'entrée de l'autre et vice versa (Figure A.2). Les points de

communication de même nature ne peuvent donc pas être connectés entre eux : un point « M » ne peut être connecté qu'à un point « L » et vice versa.

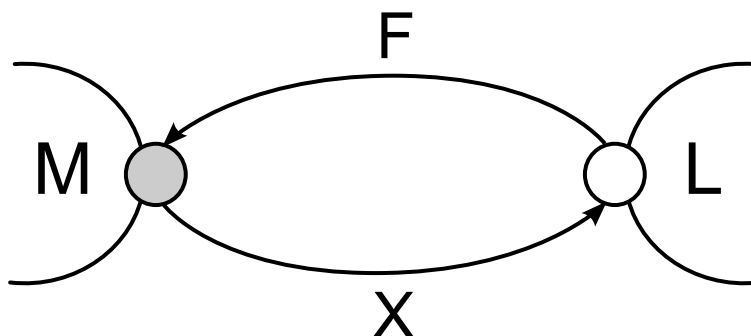


FIGURE A.2 – Connexion entre un point de communication « M » et un point de communication « L »

Les règles de connexion entre les points de communication Cordis Anima sont construites selon les relations entre les variables extensives et les variables intensives. De plus, comme la force est une variable intensive, il est possible d'ajouter plusieurs forces à l'entrée d'un point de communication « M ». La position, quant à elle, est une variable intensive. Le point « L » ne reçoit donc qu'une seule position. Un modèle simulable doit alors respecter les règles de connexion entre les points de communication « M » et « L » établies comme suit :

- Un point « M » peut être connecté à plusieurs points « L ». La position de sortie du point « M » est alors calculée à partir de la somme des différentes forces reçues des points « L » auxquels il est connecté.
- Un point « L » doit être connecté à un seul point « M ».

## A.2 Les modules Cordis Anima

Le formalisme Cordis Anima est basé sur un principe de modularité et donc sur la notion de modules composant un modèle.

Dans le formalisme Cordis Anima, un module est un algorithme indépendant comportant au moins un point de communication « M » ou « L », par lequel il est relié au reste du modèle. Cet algorithme doit permettre de calculer sa sortie à chaque pas de simulation en fonction des entrées reçues.

Même si le langage Cordis Anima pourrait permettre de créer n'importe quel module avec un nombre de points de communication arbitraire, les bases du système de modélisation permettent de créer une grande variété de modèles et sont constituées par deux types de modules élémentaires :

- Les modules <MAT> c'est à dire des éléments matériels comportant un point de communication « M ».
- Les modules <LIA> c'est à dire des éléments de liaison comportant deux points de communication « L ».

La Figure A.4 montre les modules élémentaires <MAT> et <LIA>.

En considérant la position X calculée par un module <MAT> comme une propriété intrinsèque, le module <MAT> peut alors être considéré comme un objet physique, plus précisément une masse ponctuelle située dans l'espace de simulation. La position de cette masse est calculée à partir des forces qu'il reçoit à travers son point de communication « M ». Le module <LIA> relie deux modules <MAT> sur lesquels il exerce des forces de même magnitude mais de sens opposé. Ces forces sont calculées à partir de

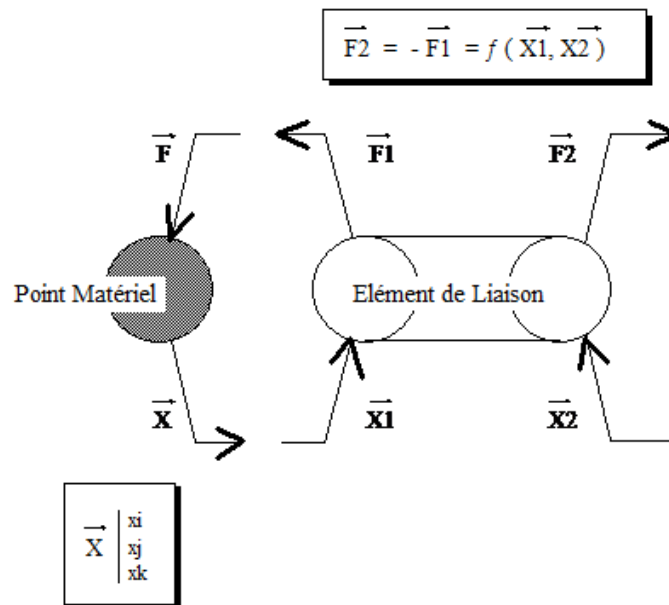


FIGURE A.3 – Modules élémentaires &lt;MAT&gt; et &lt;LIA&gt;

la position qu'il reçoit à travers son point de communication « L ». Un module <LIA> représente une interaction physique basée sur le principe d'action-réaction de la troisième loi de Newton.

Ces modules élémentaires permettent de construire différents modèles basés sur le principe des masses-interactions. La Figure A.4 montre un exemple de réseau Cordis Anima construit à partir de modules élémentaires <MAT> et <LIA>. Ces réseaux forment des objets virtuels dynamiques pouvant être simulés. Ces objets peuvent se déformer ou osciller selon les algorithmes utilisés. Ils peuvent également produire, en utilisant des transducteurs, des sons, des images et des mouvements.

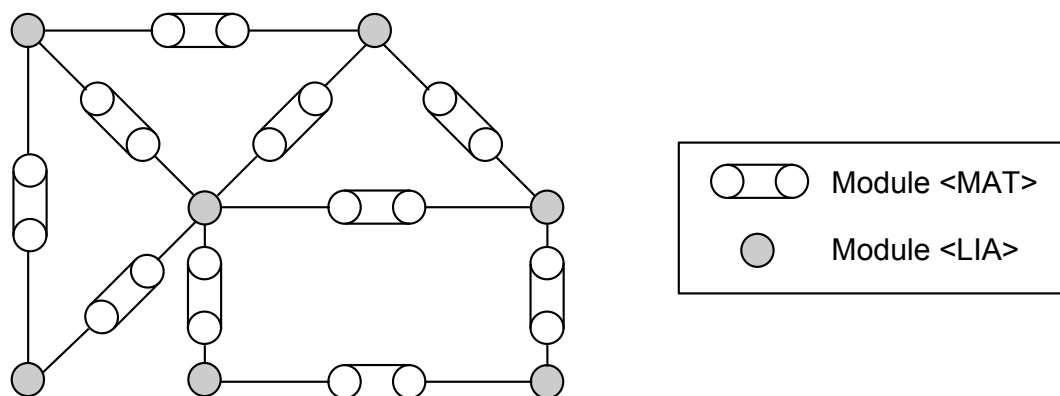


FIGURE A.4 – Exemple de réseau Cordis Anima

Il existe différents modules élémentaires, de type MAT et LIA définis dans Cordis Anima [Castagne, 2002] :

**MAS** Ce module représente un objet caractérisé par une inertie. Il a le comportement physique d'une masse selon les lois de Newton. Son paramètre est la masse  $M$ .

**SOL** Ce module correspond au point fixe ou au point de référence d'un objet modélisé dans Cordis Anima. Il n'a pas de paramètres.

**RES** Ce module représente le comportement d'un ressort. Son paramètre est la constante de raideur  $K$ .



**FRO** Ce module représente un frottement visqueux. Son paramètre est le coefficient d'amortissement  $B$ .

Il existe également d'autres modules appelés modules intégrés résultant de l'assemblage de plusieurs modules élémentaires.

**REF** Ce module résulte de l'intégration d'un module RES et d'un module FRO. Il représente une visco-élasticité. Ses paramètres sont la constante de raideur  $K$  et le coefficient d'amortissement  $B$ .

**CEL** Ce module représente un oscillateur élémentaire. Il est composé d'un module MAS, d'un module SOL et d'un module REF. Ses paramètres sont la masse  $M$ , la constante de raideur  $K$  et le coefficient d'amortissement  $B$ .

**BUT** Ce module représente une butée viscoélastique, modélisant un contact entre deux objets et leur impénétrabilité. Ses paramètres sont la constante de raideur  $K$ , le coefficient d'amortissement  $B$  exprimant la viscoélasticité lors du contact et le seuil  $S$  exprimant la condition de contact.

**LNL** Ce module représente une liaison non linéaire paramétrable permettant de modéliser de nombreux types d'interaction.

### A.3 Les algorithmes Cordis Anima

Le formalisme Cordis Anima utilisé pour la modélisation sur la plateforme temps réel, est basé sur la notion de suite récurrente pour le calcul des vitesses et des accélérations à partir de valeurs discrètes. Une simulation avec Cordis Anima est synchrone et sa fréquence d'échantillonnage est fixe. Les variables de position et de force à l'instant  $n$  sont définies respectivement par  $X(n)$  et  $F(n)$ .

Deux principales phases sont exécutées en un pas de simulation du modèle Cordis Anima :

- Le calcul des modules <LIA> : Chaque module <LIA> calcule une force  $F(n)$  à l'instant  $n$  en fonction des positions ou des vitesses aux instants  $n$  et  $n - 1$  du module <MAT> auquel il est connecté. Ces forces sont ensuite transmises au module <MAT>.
- Le calcul des modules <MAT> : Chaque module <MAT> calcule la position  $X(n + 1)$  à l'instant suivant  $n + 1$  à partir des forces reçues à l'instant  $n$ . Cette position est transmise à chacun des modules <LIA> auxquels il est connecté.

Nous observons qu'il est toujours nécessaire de définir les conditions initiales de tous les modules Cordis Anima utilisés avant la simulation du modèle.

Selon les définitions précédentes, la vitesse d'un module <MAT> dans Cordis Anima à un instant  $n$  peut être définie comme la différence entre la position à cet instant,  $X(n)$ , et la position à l'instant précédent  $X(n - 1)$ , divisée par la période d'échantillonnage :

$$V(n) = \frac{X(n) - X(n - 1)}{T_e} \quad (\text{A.1})$$

L'unité de temps interne de Cordis Anima est la période d'échantillonnage. L'écart entre deux échantillons est alors unitaire. La vitesse sur Cordis Anima est alors définie par :

$$V(n) = X(n) - X(n - 1) \quad (\text{A.2})$$

L'approximation discrète de l'accélération  $A(n)$  à l'instant  $n$ , à partir des vitesses  $V(n)$  et  $V(n-1)$  aux instants  $n$  et  $n-1$ , est définie dans Cordis Anima par :

$$A(n) = V(n) - V(n-1) \quad (\text{A.3})$$

Elle peut également être exprimée en fonction de la position par :

$$A(n) = X(n+1) - 2X(n) + X(n-1) \quad (\text{A.4})$$

## A.4 Equivalence entre les paramètres Cordis Anima et les paramètres physiques

Comme l'unité de temps utilisée dans Cordis Anima est la période d'échantillonnage, il est nécessaire de choisir une méthode de correspondance des paramètres. En choisissant la correspondance de la raideur, la raideur et la position ne dépendent pas de la période d'échantillonnage. Cependant, la force ainsi que les paramètres des modules tels que la masse et la viscosité n'ont pas les mêmes unités dans Cordis Anima que dans l'environnement réel. Elles dépendent de la période d'échantillonnage. De plus, comme montré dans le Chapitre 5, dans le cas des modèles implantés en utilisant Cordis Anima sur le simulateur temps réel ERGON\_X<sup>1</sup>, la relation entre l'environnement réel et l'environnement virtuel pour toutes les variables et tous les paramètres, est conditionnée par les gains électroniques et logiciels de la position et de la force. De façon générale, en accord avec les travaux effectués durant cette thèse, les équivalences entre les variables et les paramètres dans Cordis Anima et les paramètres de l'environnement réel sont données dans le Tableau A.1.

GRANDEUR PHYSIQUE	VALEUR RÉELLE MESURÉE	EQUIVALENCE VIRTUELLE
Position [x - X]	1[m]	$\alpha$
Force [f - F]	$1[N] = 1[\frac{Kg \cdot m}{s^2}]$	$\frac{1}{\beta}$
Temps [t]	1[s]	$\frac{1}{T_e}$
Masse [m]	1[Kg]	$\frac{1}{\alpha \beta T_e^2}$
Raideur [k]	$1[\frac{N}{m}] = 1[\frac{Kg}{s^2}]$	$\frac{1}{\alpha \beta}$
Viscosité [b]	$1[\frac{N \cdot s}{m}] = 1[\frac{Kg}{s}]$	$\frac{1}{\alpha \beta T_e}$

TABLEAU A.1 – Equivalences entre les valeurs réelles mesurées et les valeurs virtuelles selon la normalisation par correspondance de la raideur. Dans ce cas, les gains de position et de force peuvent être réglés à 1

## A.5 Interaction entre le TGR et les modèles CORDIS

Dans le cadre de la simulation haptique, les modèles sont implantés sur le simulateur en utilisant le formalisme Cordis Anima. Ces modèles permettent une simulation multisensorielle à travers des transducteurs, notamment un transducteur gestuel rétroactif. Le TGR envoie un signal au simulateur qui réalise

1. Sur GENESIS et MIMESIS, l'équivalence des paramètres réels-virtuels est donnée uniquement par la fréquence d'échantillonnage. Il n'y a pas de coefficients supplémentaires à prendre en compte comme dans le cas du simulateur temps réel ERGON\_X.

des calculs selon les algorithmes implémentés et lui retourne un signal. Si le TGR fonctionne en mode impédance, le signal envoyé au simulateur est le signal de position issu des capteurs. Le simulateur lui retourne alors un signal de force. Le TGR peut ainsi être considéré comme un module de type <MAT>, pouvant être connecté à plusieurs modules <LIA>, comme le montre la Figure A.5.

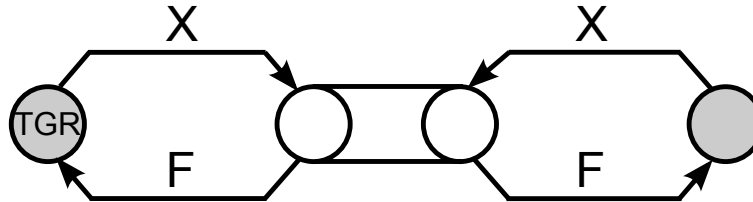


FIGURE A.5 – Un TGR en mode impédance vu comme un module de type <MAT>

Si le TGR fonctionne en mode admittance, il envoie au simulateur un signal de force et reçoit en retour un signal de position. Il peut donc être considéré comme un module de type <LIA> pouvant être connecté avec un module de type <MAT>, comme le montre la Figure A.6.

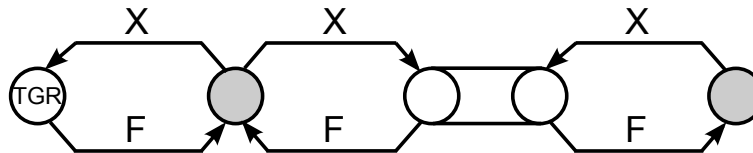


FIGURE A.6 – Un TGR en mode admittance vu comme un module de type <LIA>

Pour la suite, nous considérerons le TGR comme un module des modèles simulés en utilisant le formalisme Cordis Anima.

## A.6 Applications du formalisme Cordis Anima

- La création sonore. Le logiciel de création musicale par ordinateur GENESIS a été développé en utilisant ce formalisme [Castagne, 2002] [Tache, 2008].
- La création d'images animées. L'outil MIMESIS pour la simulation du mouvement utilise également ce formalisme [Allaoui, 2010].
- La simulation interactive multisensorielle. Les simulations implantées dans le simulateur ERGON\_X utilisent également le formalisme Cordis Anima [Couroussé, 2008].

## Annexe B

# La technologie ERGOS

La technologie ERGOS dont nous disposons aujourd'hui est le résultat de nombreuses années de recherche au sein du Laboratoire ICA/ACROE. Le système ERGOS est une interface haptique modulaire dont les principales caractéristiques sont :

- Une morphologie modifiable par l'utilisation de divers manipulateurs adaptables sur un même dispositif.
- Un nombre de degrés assez élevé pouvant être augmenté grâce à la configuration par tranche du dispositif.
- Des performances dynamiques élevées.

Nous présentons, dans cette annexe, une description des caractéristiques et des performances des dispositifs ERGOS [Florens et al., 2004].

### B.1 Caractéristiques Générales

Type de contrôle	Impédance
Puissance requise	1000 W
Inertie de chaque tranche mobile	environ 300 g

TABEAU B.1 – Caractéristiques générales de la technologie ERGOS

### B.2 Caractéristiques Mécaniques

Déplacement total de la tranche mobile	20mm à partir de la position de repos
Espace de travail	Configurable par des habillages mécaniques modulaires
Nombre de degrés de liberté	Configuration modulaire par tranche permettant l'ajout de degrés de liberté.
Force de friction maximale	5e-3 N

TABEAU B.2 – Caractéristiques mécaniques de la technologie ERGOS

### B.3 Caractéristiques des actionneurs de la technologie ERGOS

Principe de fonctionnement	Bobines électromagnétiques mobiles
Force Maximale	200 N
Force Maximale (Continu)	60 N
Vitesse Maximale	$1.8 \frac{m}{s}$
Accélération Maximale	$60 \frac{m}{s^2}$

TABLEAU B.3 – Caractéristiques des actionneurs de la technologie ERGOS

### B.4 Caractéristiques des capteurs de la technologie ERGOS

Type de capteurs	LVDT
Résolution	$1 \mu m$

TABLEAU B.4 – Caractéristiques des capteurs de la technologie ERGOS

### B.5 Habillages mécaniques disponibles dans la technologie ERGOS

Clavier	jusqu'à 12 degrés de liberté Déplacement vertical de 50 mm par touche (à partir de l'extrémité de la touche)
Stick 2D ou archet	2 degrés de liberté Espace de travail : 150x150 mm
Stick 3D	3 degrés de liberté Espace de travail : (WxLxH) 60x60x25 mm
Stick 6D	6 degrés de liberté Espace de travail : Translations : (WxLxH) 50x50x25 mm Rotations : 60° sur les 3 axes

TABLEAU B.5 – Habillages mécaniques disponibles dans la technologie ERGOS

La Figure B.1 montre la gamme complète des dispositifs ERGOS avec différentes morphologies de manipulateur.

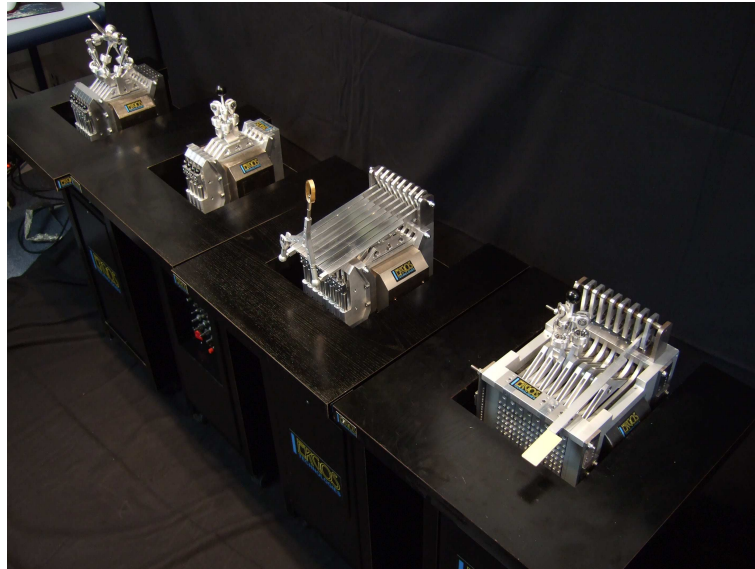


FIGURE B.1 – Gamme des dispositifs ERGOS avec différentes morphologies de manipulateur